



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ARTTU OLLIKKALA  
SILLAN PÄÄLLYSRAKENTEEEN MUODONMUUTOSTEN MONI-  
TOROINTI  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 8. kesäkuuta  
2016

## TIIVISTELMÄ

**ARTTU OLLIKKALA:** Sillan päällysrakenteen muodonmuutosten monitorointi  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 83 sivua, 53 liitesivua  
Marraskuu 2016  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Liikenne- ja kuljetusjärjestelmät  
Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen

Avainsanat: anturi, valokuitu, FBG, mikrotaipuma, kestävyys, kustannukset

Työn tavoitteena oli esitellä siltojen tarkastustoimintaan liittyvän monitoroinnin tilaa siltojen rakenteellisen kunnan seurannassa. Työssä selvitettiin monitoroinnin kokonaiskustannusten muodostumista, monitorointijärjestelmien ja niihin liitettävien antureiden pitkäaikaiskestävyyttä sekä Suomessa tapahtuvan siltojen monitoroinnin haasteita. Tutkimustulokset perustuvat julkaisuihin ja asiantuntijahaastatteluihin. Työtä varten koekuormitettiin silta kahden monitorointipalvelutoimittajan antureiden vertailemiseksi.

Siltojen kuntoa ja vaurioitumista seurataan kuntotarkastuksilla. Jos sillan rakenteessa havaitaan kantavuuteen vaikuttavia vaurioita, silta voidaan asettaa tehostettuun tarkkailuun. Tehostettu tarkkailu voidaan suorittaa monitoroimalla siltaa kiinteillä mittalaitteilla sillan turvallisen käytön mahdollistamiseksi. Monitoroinnin ollessa verrattain uutta eivät käytännöt ole vielä vakiintuneet. Liikennevirasto on vuoden 2016 aikana julkaisemassa monitorointiohjeet sekä tilaajille että toimittajille monitoroinnin suunnittelun ja toteuttamisen helpottamiseksi.

Monitorointiprojektin kustannuksiin vaikuttavat pääosin monitoroinnin kesto ja monitoroinnin laajuuden valinta (anturimäärä). Antureiden langattomuudella voidaan saavuttaa säästöjä laitekustannuksissa. Anturien pitkäaikaiskestävyys riippuu anturin laadusta ja sen suojauksesta ympäristörasituksia vastaan. Monitorointijärjestelmässä vikaantumisherkimpiä ovat kuitenkin keskusyksiköt ja virtalähteet, antureiden hajoamisten ollessa yksittäistapauksia. Tällä hetkellä haastavinta monitoroinnissa on mittaustulosten käsittely ja vertailu sillan lujuusmalliin.

Kenttämittauskohteena toimi Keltin silta (neliaukkoinen teräsbetonikantinen ja 2-palkkinen teräspalkkisilta). Siltaan asennettiin kuituoptisia venymäantureita (FBG ja mikrotaipuma) sekä siirtymä- ja taipuma-antureita. Myös langatonta anturitekniikkaa testattiin. Anturivertailua suoritettiin lähinnä sillan keskiaukon keskelle asennettujen venymäantureiden kesken. Antureiden lähtötasot vaihtelivat epätäydellisen lämpötilakompensoinnin ja rakenteellisen sijainnin vuoksi. Anturien mittaustuloksille määritettiin huipusta huippuun arvot vertailun helpottamiseksi. Selvimmät erot mittaustuloksissa esiintyivät teräspalkin venymäantureissa. Mittauserot saattoivat johtua antureiden asennustavasta, niiden sijainnista rakenteessa, teräspalkin muodosta sekä kuorman epäkeskisestä jakautumisesta. Tarkempi selvitys vaatisi vertailua sillan FEM-laskentatuloksiin.

Mittalaitteet rajoittavat koekuormitusten suorittamistapaa, jos niiden mittaustaajuus ei ole tarpeeksi korkea. Langattomien antureiden dynaamisten tapahtumien havaitsemisessa oli ongelmia, joten ne eivät tällä hetkellä sovellu siltojen monitorointiin. Vastaavasti tiedonsiirtokaapeilla mittalaitteisiin yhdistetyt anturit toimivat mittauksissa moitteetta.

## ABSTRACT

**ARTTU OLLIKKALA:** Monitoring Deformations in Bridge Superstructure

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 83 pages, 53 Appendix pages

November 2016

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Traffic and Transportation Systems

Examiner: Professor Anssi Laaksonen

**Keywords:** sensor, optical strand, FBG, micro bending, durability, costs

The aim of the research was to present findings regarding structural health monitoring (SHM) of bridges. The scope of the research includes financial configurations of SHM, durability of monitoring systems and sensors; as well as the difficulties in relation to the application of this relatively recent methodology in Finland. Research results are based on relevant literature and accredited interviewing of experts. In addition, an experiment was implemented to compare two SHM systems.

The bridges are monitored with regular inspections. If damage has been found to affect a bridge's load-bearing capacity, the bridge may be put under enhanced observation; this can be done by installing measurement devices such as sensors to measure the capacity of safe use. Although SHM is a relatively new methodology, the Finnish Transport Agency have already established guidelines in 2016 that should aid clients and service providers to plan and implement SHM accordingly.

The costs of an SHM project relies heavily on the duration of the project and the quantity of sensors required. Reduction in cost can be achieved by adopting wireless sensor technology. Long-term durability of the sensors depends on product quality as well as protection against environmental weathering. Mainframe computers and power supplies are the parts most susceptible to natural damage. According to the latest research, the most challenging aspect of SHM is in the processing of raw data collected from the sensors and comparing such data to the strength model of the bridge.

A 4-span steel girder bridge was equipped with fiber optic strain gauges (FBG and microbending) as well as displacement and deflection sensors. Wireless sensor technology was also incorporated in the testing. Sensors were placed along the mid-span of a bridge and compared to accordingly. Initial levels of data collected vary due to incomplete temperature compensation and sensor location. Baselines of the data collected in different sensors were readjusted to equal levels in order to ensure accuracy. Substantial results were seen when strain sensors were placed on the steel girder. This difference may be attributed to eccentric load distribution, the installation and location of the sensors, as well as the shape of the steel girder. FEM results are necessary for further detail.

Loading tests are heavily dependent on devices. For example, a measurement device capable of higher sampling frequencies will provide more accurate results. The wireless sensors had difficulty detecting dynamic events and this makes them unsuitable for monitoring bridges while sensors with link cables worked faultlessly.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknilliseen yliopistoon Liikenneviraston tilauksesta ja Inspecta Oy:n palveluksessa.

Työtäni ohjasi Liikennevirastolta Tekn. lis. Timo Tirkkonen ja Inspecta Oy:stä DI Leena Sarell-Kankaanpää. Haluan kiittää molempia erittäin asiantuntevasta ohjauksesta työn aikana sekä kommentteista työhön liittyen. Ihailen Leena energiaasi hoitaa asioita kenttämittausten mahdollistamiseksi.

Kiitän myös ohjausryhmän jäseniä, TTY:n professori Anssi Laaksosta ja Inspecta Oy:n DI Timo Lauria, panostuksesta työtäni kohtaan. Iso kiitos myös koko Inspecta Oy:n Oulun toimistolle rennosta työilmapiiristä ja lähes joka viikoittaisista ”nimipäiväpullista”.

Lisäksi haluan erityisesti kiittää sinua rakas Jessica.

Helsingissä, 22.11.2016

Arttu Ollikkala

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Työn tausta .....	1
1.2	Tavoitteet ja aiheen rajausta .....	1
1.3	Tutkimusmenetelmät ja – aineisto.....	2
2.	SILLASTO SUOMESSA .....	3
2.1	Yleistä.....	3
2.2	Rakennusmateriaalit ja niiden vaurioitumismekanismit .....	3
2.2.1	Teräsbetoni .....	3
2.2.2	Teräs .....	5
2.2.3	Puu .....	6
2.3	Ikäjakama rakennusmateriaaleittain .....	7
2.4	Kuntotarkastukset .....	9
2.5	Siltojen kunto .....	10
2.6	Koekuormitusmenetelmät .....	11
2.6.1	Staattinen kuormituskoe.....	12
2.6.2	Dynaaminen kuormituskoe .....	12
2.6.3	Muut koekuormitustyytit.....	13
2.7	Kantavuustarkastelu .....	14
3.	SILTOJEN MONITOROINTI .....	16
3.1	Yleistä.....	16
3.2	Monitoroinnin tarpeet ja tavoitteet .....	17
3.3	Monitorointijärjestelmän rakenne .....	20
3.4	Monitorointi maailmalla.....	21
3.4.1	Yleistä .....	21
3.4.2	Tutkimussuunnat .....	22
3.4.3	Kustannukset .....	22
3.4.4	Kestävyys .....	25
3.4.5	Haasteet .....	26
3.5	Liikenneviraston monitorointiohjeet .....	27
3.5.1	Monitorointimenetelmät.....	27
3.5.2	Monitoroinnin laajuus .....	29
3.5.3	Monitorointiprojekti.....	30
4.	TARKASTELEVAT SUUREET JA NIIDEN MITTAUSMENETELMÄT .....	34
4.1	Venymä .....	34
4.1.1	Vastusvenymäliuska.....	34
4.1.2	Mikrotaipuma – valokuituanturi .....	35
4.1.3	FBG – valokuituanturi .....	37
4.2	Taipuma.....	38
4.2.1	Takymetri .....	38

4.2.2	DMM – tasomittauslaite.....	39
4.2.3	PSM-R M2 – siirtymämittauslaite .....	41
4.3	Halkeamaleveys .....	42
4.3.1	Siirtymäanturi.....	42
4.3.2	Optinen ekstensiometri .....	43
4.3.3	Fotogrammetria .....	44
4.4	Antureiden hintaluokat .....	45
5.	KENTTÄMITTAUSJÄRJESTELY .....	46
5.1	Monitoroitava silta .....	46
5.2	Monitorointi .....	47
5.3	Anturit ja mittalaitteet .....	47
5.3.1	Antureiden sijainnit.....	48
5.3.2	Antureiden asennus .....	54
5.4	Koekuormitukset ja niiden tulokset .....	57
5.4.1	Tulokset: koekuormitus A.....	59
5.4.2	Tulokset: koekuormitus B.....	61
5.5	Normaaliliikenteen vaikutukset (pitkäaikaisessa monitoroinnissa) .....	64
6.	ANTURIVERTAILU.....	66
6.1	Teräspalkin venymät ja taipumat .....	66
6.2	Kansilaatan venymät .....	70
6.3	Kohinan keskihajonta.....	72
7.	POHDINTA .....	73
7.1	Kokemukset antureista .....	73
7.2	Ehdotus pitkäaikaisesta anturoinnista .....	74
8.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	76
	LÄHTEET .....	79

LIITE A: TAVALLISIMMAT ANTURITYYPIT SILTOJEN MONITOROINNISSA

LIITE B: YKSITYISKOHTAINEN PROSESSIKAAVIO VAIHEITTAISEN MONITOROINNIN TOTEUTTAMISESTA

LIITE C: YKSITYISKOHTAINEN PROSESSIKAAVIO KESKITETYN MONITOROINNIN TOTEUTTAMISESTA

LIITE D: YKSITYISKOHTAINEN PROSESSIKAAVIO HAJAUTETUN MONITOROINNIN TOTEUTTAMISESTA

LIITE E: MONITOROINTI- JA TURVALLISUUSUUNNITELMIEN SISÄLLÖT

LIITE F: MONITOROINNIN TOTEUTUSSUUNNITELMAN SISÄLTÖ

LIITE G: MITTAUS- JA MONITOROINTIRAPORTTIEN SISÄLLÖT

LIITE H: AJONEUVOT KOEKUORMITUKSISSA

LIITE I: KOEKUORMITUKSEN A MITTAUSTULOKSET (EI ANTURIVERTAILUSSA)

LIITE J: KOEKUORMITUKSEN B MITTAUSTULOKSET (EI ANTURIVERTAILUSSA)

LIITE K: KELTIN SILLAN MONITOROINTI- JA TOTEUTUSSUUNNITELMA

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Teräsbetonirakenteiden vaurioitumisen tavalliset syyt (SFS EN 1504-9 2009).</i>	4
<b>Kuva 2.</b>	<i>Halkeamien jako syntyajan ja aiheuttajien suhteen (Liikennevirasto 2013c).</i>	5
<b>Kuva 3.</b>	<i>Teräsrakenteiden yleisimmät vaurionaiheuttajat (Liikennevirasto 2013c).</i>	6
<b>Kuva 4.</b>	<i>Tiesiltojen ikäjakauma rakennusmateriaaleittain 1.1.2015 (perustuu lähteeseen Liikennevirasto 2015a).</i>	8
<b>Kuva 5.</b>	<i>Rautatiesiltojen ikäjakauma rakennusmateriaaleittain 1.1.2015 (perustuu lähteeseen Liikennevirasto 2015a).</i>	8
<b>Kuva 6.</b>	<i>Tiesiltojen kuntoluokka iän mukaan 1.1.2015 (perustuu lähteeseen Liikennevirasto 2015a).</i>	11
<b>Kuva 7.</b>	<i>Rautatiesiltojen kuntoluokka iän mukaan 1.1.2015 (perustuu lähteeseen Liikennevirasto 2015a).</i>	11
<b>Kuva 8.</b>	<i>Siltojen suurimmat sallitut halkeamaleveydet (Liikennevirasto 2015b).</i>	15
<b>Kuva 9.</b>	<i>Monitorointi siltojen tarkastusjärjestelmässä (Liikennevirasto 2016b).</i>	16
<b>Kuva 10.</b>	<i>Monitoroinnin polku monitorointitarpeesta haluttuun tavoitetilään (Liikennevirasto 2016b).</i>	19
<b>Kuva 11.</b>	<i>Erään monitorointijärjestelmän yleiskuva (Dimense Oy 2014).</i>	20
<b>Kuva 12.</b>	<i>Kustannusten suuruusluokka eri monitorointimenetelmillä (Kiviluoma 2007).</i>	24
<b>Kuva 13.</b>	<i>Yhteenveto Smartec-järjestelmällä suoritetuista monitoroinneista (perustuu lähteeseen Inaudi et al. 2008).</i>	25
<b>Kuva 14.</b>	<i>Monitorointimenetelmien sijoittuminen sillan elinkaareissa (Liikennevirasto 2016b).</i>	28
<b>Kuva 15.</b>	<i>Monitorointiprojektin päävaiheet ja siihen kuuluvat asiakirjat (Liikennevirasto 2016b).</i>	31
<b>Kuva 16.</b>	<i>Tiedonkulku vaiheittaisessa monitoroinnin toteutusmuodossa (Liikennevirasto 2016b).</i>	32
<b>Kuva 17.</b>	<i>Tiedonkulku keskitetyssä monitoroinnin toteutusmuodossa (Liikennevirasto 2016b).</i>	33
<b>Kuva 18.</b>	<i>Tiedonkulku hajautetussa monitoroinnin toteutusmuodossa (Liikennevirasto 2016b).</i>	33
<b>Kuva 19.</b>	<i>Periaatteellinen kuva vastusvenymäliuskasta (United Electronic Industries 2013).</i>	35
<b>Kuva 20.</b>	<i>Periaatekuva kuitupunoksesta (Inaudi et al. 2001).</i>	36



<b>Kuva 21.</b>	<i>Vasemmalla OSMOS-valokuituantureiden asennuksessa käytettävä aluslevy. Oikealla anturipää asennettuna aluslevyyn.</i> .....	36
<b>Kuva 22.</b>	<i>FBG – valokuituanturin toimintaperiaate (perustuu lähteeseen Lyöri 2007).</i> .....	37
<b>Kuva 23.</b>	<i>FBG-pistevenymäanturit pistehitsaus- ja liimausasennukseen (Micron Optics 2016).</i> .....	38
<b>Kuva 24.</b>	<i>Putkivenymäanturit asennettavissa rakenteen sisälle (vas.) ja pinnalle (oik.) (Micron Optics 2016).</i> .....	38
<b>Kuva 25.</b>	<i>Putkivenymäanturien kiinnitysholkkeja (ruuvaus, betonivalu, hitsaus, kemiallinen ankkurointi) (Micron Optics 2016).</i> .....	38
<b>Kuva 26.</b>	<i>Takymetri Leica TPS1200+ (Leica Geosystems 2016).</i> .....	39
<b>Kuva 27.</b>	<i>DMM-yksikkö ja tasolaser Leica Rugby 830 (Dimense Oy 2016).</i> .....	40
<b>Kuva 28.</b>	<i>DMM-yksikkö kiinnitettynä teräspalkin alalaippaan (Lyöri 2016).</i> .....	40
<b>Kuva 29.</b>	<i>Rakenteeseen kiinnitettävä prisma-ryhmä ja yksittäinen prisma sekä PSM-R M2 – siirtymämittaustilaite (Noptel Oy 2016).</i> .....	41
<b>Kuva 30.</b>	<i>PSM-R M2 – siirtymämittaustilaitteen toimintaperiaate (perustuu lähteeseen Noptel 2016).</i> .....	41
<b>Kuva 31.</b>	<i>Lineaaripotentiometrin kokoonpano (Instrumentation Today 2011).</i> .....	42
<b>Kuva 32.</b>	<i>Yleinen LVDT-anturin kokoonpano (National Instruments 2016).</i> .....	43
<b>Kuva 33.</b>	<i>Optinen ekstensiometri (OSMOS Canada 2016).</i> .....	43
<b>Kuva 34.</b>	<i>Konenäkökameran kuva-alan määräytyminen.</i> .....	44
<b>Kuva 35.</b>	<i>Keltin silta Kouvolassa kuvattuna sillan pohjoispuolelta tuella T5.</i> .....	46
<b>Kuva 36.</b>	<i>Anturointi sillan sivuleikkauskuvassa välillä T3-T5.</i> .....	49
<b>Kuva 37.</b>	<i>Anturointi sillan tasokuvassa välillä T3-T5.</i> .....	50
<b>Kuva 38.</b>	<i>Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan eteläisessä teräspalkissa keskiaukossa SP3.</i> .....	50
<b>Kuva 39.</b>	<i>Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan pohjoisessa teräspalkissa keskiaukossa SP3.</i> .....	51
<b>Kuva 40.</b>	<i>Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan kannessa keskiaukossa SP3. Kuvassa pohjoinen pääkannattaja.</i> .....	51
<b>Kuva 41.</b>	<i>Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan eteläisessä teräspalkissa tuella T4.</i> .....	52
<b>Kuva 42.</b>	<i>Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan pohjoisessa teräspalkissa tuella T4.</i> .....	52
<b>Kuva 43.</b>	<i>Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan eteläisessä teräspalkissa aukossa SP4.</i> .....	53
<b>Kuva 44.</b>	<i>Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan pohjoisessa teräspalkissa aukossa SP4.</i> .....	53
<b>Kuva 45.</b>	<i>a) DMM-yksikkö kiinni uumassa ja b) tasolaser välituella T4.</i> .....	54
<b>Kuva 46.</b>	<i>Teräspalkkiin hitsattu pistevenymäanturi os3100.</i> .....	55
<b>Kuva 47.</b>	<i>Magneeteilla asennettu putkianturi os3610.</i> .....	55

<b>Kuva 48.</b>	<i>Antureita asennettuna betonikannen pintaan ja poikkirauhoitukseen.....</i>	<i>55</i>
<b>Kuva 49.</b>	<i>OSMOS-anturien aluslevyjen liimauksessa ylälaippaan apuna magneetit. ....</i>	<i>56</i>
<b>Kuva 50.</b>	<i>Siirtymäanturi asennettuna. ....</i>	<i>56</i>
<b>Kuva 51.</b>	<i>Venymien suuruusluokka eri rakenneosissa koekuormituksen A aikana. ....</i>	<i>59</i>
<b>Kuva 52.</b>	<i>Venymien suuruusluokka keskiaukon teräspalkin alalaipassa koekuormituksen B aikana.....</i>	<i>62</i>
<b>Kuva 53.</b>	<i>Pysyvien muodonmuutosten kuvaaja ajalta 13.5 – 13.6.2016.....</i>	<i>64</i>
<b>Kuva 54.</b>	<i>Koekuormituksen A teräspalkin alalaipan venymäanturit. Ylhäällä oSgL 2 (lähimpänä uumaa), keskellä oSgS 3 ja alhaalla oSgP 21. ....</i>	<i>66</i>
<b>Kuva 55.</b>	<i>Koekuormituksen B teräspalkin alalaipan venymäanturit. Ylhäällä oSgL 2 (lähimpänä uumaa), keskellä oSgLW 24 ja alhaalla oSgL 23. ....</i>	<i>66</i>
<b>Kuva 56.</b>	<i>Kuormitusvaiheen A1 mittausarvot teräspalkkiin asennetuille antureille keskiaukossa (SP3).....</i>	<i>67</i>
<b>Kuva 57.</b>	<i>Kuormitusvaiheen B11 venymät teräspalkin alalaipalle keskiaukossa (SP3). ....</i>	<i>68</i>
<b>Kuva 58.</b>	<i>Teräspalkin alalaipan venymäantureiden p2p-arvot koekuormituksessa A. ....</i>	<i>69</i>
<b>Kuva 59.</b>	<i>Teräspalkin alalaipan keskiaukon (SP3) venymäantureiden p2p-arvot koekuormituksessa B. ....</i>	<i>69</i>
<b>Kuva 60.</b>	<i>Teräspalkin venymän ja taipuman p2p-arvot koekuormituksessa A. ....</i>	<i>70</i>
<b>Kuva 61.</b>	<i>Koekuormitusvaiheen A1 venymät kansilaatan antureille. ....</i>	<i>71</i>
<b>Kuva 62.</b>	<i>Kansilaatan alapinnan venymäantureiden p2p-arvot koekuormituksessa A. ....</i>	<i>71</i>

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

BWIM	Bridge Weigh-In-Motion, mittaussysteemi, jossa siltaa käytetään vaakana liikennemäärien ja ajoneuvoluokkien määrittämisessä
FBG	Fiber Bragg Grating, valokuiduissa käytetty tekniikka, jolla tietty aallonpituus saadaan heijastumaan takaisin valon tulosuuntaan
FEM	Finite Element Model, laskentamalli rakenteen jännitystilojen analysointiin
HCT	High Capacity Transport, normaalia pidempi tai raskaampi ajoneuvoyhdistelmä tieliikenteessä
KVL	Keskivuorokausiliikenne
P2P	peak-to-peak, dynaamisen tapahtuman minimin ja maksimin huipusta huippuun arvo
SHM	Structural Health Monitoring, rakenteen kunnon monitorointi
$E$	Materiaalin kimmomoduuli
$Hz$	Näytteistystaajuuden yksikkö mittauksissa
$L$	Alkuperäinen pituus
$\Delta L$	Pituuden muutos
$n$	Valokuidun taitekerroin
$p$	piko, $10^{-12}$
$\varepsilon$	Venymä
$\mu$	mikro, $10^{-6}$
$\mu\varepsilon$	mikrostrain, mikrovenymä, venymän yksikkö, ( $1 \mu\text{m}/\text{m}$ )
$\lambda_b$	Aallonpituus
$\Lambda$	Valokuidussa olevan hilan jakso käytettäessä FBG-tekniikkaa
$\sigma$	Normaalijännitys

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Turvallinen, toimiva ja keskeytymätön liikennejärjestelmä on perusta paikalliselle ja kansalliselle taloudelle. Jotta liikenne olisi häiriötöntä, vaatii se ehjän liikenneverkon toimiakseen. Liikenneverkko koostuu muun muassa teistä ja rautateistä sekä niihin kuuluvista silloista. Siltojen täytyy kestää niiden koko käyttöikä keskeytymättömästi, jotta liikenneverkkoon ei tulisi käyttökatkoja.

Silloille suoritetaan määräajoin tarkastuksia, joilla määritetään niiden kuntoa. Tarkastukset ovat pääasiallisesti silmämääräisiä ja niiden perusteella sillan kantavuuden alenemista ei voida suoraan arvioida (Tiehallinto 2009a). Kantavuuden määrittämiseen käytetään yleensä kantavuuslaskelmia ja sillan koekuormitusta. Kuntotarkastuksien tuoksi on viimeisen 10 vuoden aikana käytetty myös monitorointia. Monitoroinnilla saatavaan tietoon perustuen pystytään muun muassa jatkamaan sillan käyttöä turvallisesti ennen sen uusimista.

Koska siltojen monitorointi on Suomessa verrattain uutta, ei monitoroinnissa käytettävistä mittausmenetelmistä ole tarpeeksi vertailevaa tietoa. Lisätietoa tarvitaan mittausmenetelmien tuloksista, tarkkuuksista sekä käyttöominaisuuksista kuten pitkäaikaiskestävyydestä vaihtelevissa ilmasto-olosuhteissa. Myös erilaisten antureiden asennuksesta ja niiden luotettavuudesta suunnitellulle monitorointiajalle on vähän tutkittua tietoa. Suomessa monitorointia on toteutettu useiden vuosien ajan. Pitkäaikaisia monitorointikohteita on edelleen toiminnassa, joten käyttäjien kokemukset ja mahdolliset kehitysehdotukset ovat tarpeellisia vertailun täydentämiseksi. Lisäksi mittausmenetelmien kokonaistaloudellisuutta on tutkittu hyvin vähän.

## 1.2 Tavoitteet ja aiheen raja

Työn tavoitteena on selvittää Liikenneviraston yleisimmät mittausmenetelmät sillan päällysrakenteiden muodonmuutoksien (venymä, taipuma, halkeama) mittaamiseen. Työssä tarkastellaan eri mittausmenetelmien soveltuvuutta koekuormituksiin sekä lyhytettä pitkäaikaisiin sillan monitorointeihin. Lisäksi selvitetään mittausmenetelmiin liittyviä ominaisuuksia:

- toimintaperiaate
- tarkkuus
- käyttökohteet/asennustekniset tekijät (rakenteen sisällä, rakenteen ulkopuolella)

- pitkäaikaisseurantaan liittyvä kestävyys
- kokonaistaloudellisuus huomioiden asennus- ja käyttötekniset vaatimukset

Työ rajataan käsittelemään vain sillan päällysrakenteiden muodonmuutoksia: venymä taipuma ja halkeama. Jokaiselle suurelle käsitellään maksimissaan kolme (3) mittausmenetelmää. Työssä käsitellään vain niitä siltatyyppejä ja mittausmenetelmiä, joista on jo tutkittua tietoa saatavilla (mm. Liikenneviraston aineisto). Työssä tukeudutaan olemassa oleviin jo tehtyihin tutkimuksiin maailmalla. Työn kenttämittauskohteessa käytetään vain kaupallisia mittalaitteita.

Työssä ei käsitellä maa- ja pystytukien toimintaa, vaurioitumista tai monitorointia. Työn tarkoituksena ei ole kehittää uutta mittausinstrumenttia tai -menetelmää eikä laskentaa.

### **1.3 Tutkimusmenetelmät ja – aineisto**

Työ perustuu kirjallisuustutkimuksiin, Suomessa toteutettuihin siltamonitorointeihin sekä työn aikana suoritettuihin kenttämittauksiin ja asiantuntijahaastatteluihin.

Työssä tutustutaan aiheesta maailmalla tehtyihin tutkimusjulkaisuihin sekä selvitetään lyhyesti eri antureiden toimintaperiaatteet ja niiden mittaustarkkuuteen vaikuttavat tekijät. Mittausmenetelmien kustannuskysymyksiä verrataan lähinnä antureiden ja monitorointijärjestelmien hintojen perusteella. Antureiden todellisen kestoiän määrittäminen työn lyhyen keston vuoksi on mahdotonta, mutta jo toteutetuista vuosia käytössä olleista kohteista pitkäaikaistoiminnan tuloksia voidaan saada. Lisäksi pitkäaikaiskeston arvioinnissa turvaudutaan kirjallisuuslähteisiin.

Kenttämittauskohde suunnitellaan työn tarkoituksen mukaiseksi, jolloin riittävää vertailua ja soveltuvuutta eri menetelmien kanssa voidaan tehdä. Kenttämittauskohteen koe-kuormituksen monitorointi suoritetaan eri mittausmenetelmin. Yhtenä referenssinä muodonmuutoksille käytetään Inspectan käyttämää optista Osmos-monitorointijärjestelmää. Haastatteluihin valitaan asiantuntijoita kertomaan kokemuksia ja kehitysehdotuksia jo suoritetuista monitoroinneista.

## 2. SILLASTO SUOMESSA

### 2.1 Yleistä

Silta on vapaa-aukoltaan vähintään kaksi metriä oleva taitorakenne, joka mahdollistaa esteen ylittämisen ajoneuvo-, henkilö-, tai muulle liikenteelle (Liikennevirasto 2013c). Tässä työssä silloista yleisesti puhuttaessa tarkoitetaan tie- ja rautatiesiltoja, jos ei erikseen muuten mainita. Tiesillat käsittävät ajoneuvoliikenteen ja kevyen liikenteen sillat. Rautatiesilloilla tarkoitetaan siltoja, jotka mahdollistavat esteen ylittämisen rautatieliikenteelle. Silloiksi luokitellaan myös putkisillat, joiden vapaa-aukko on vähintään kaksi metriä. Putkisilta johtaa tien penkereen läpi ja toimii kulkureittinä kevyelle liikenteelle, maataloudelle tai vesistölle. Liikenneviraston hallintaan kuului vuoden 2015 alussa 15122 tiesiltaa ja 2375 kiskoliikenteen rautatiesiltaa. (Liikennevirasto 2015a)

### 2.2 Rakennusmateriaalit ja niiden vaurioitumismekanismit

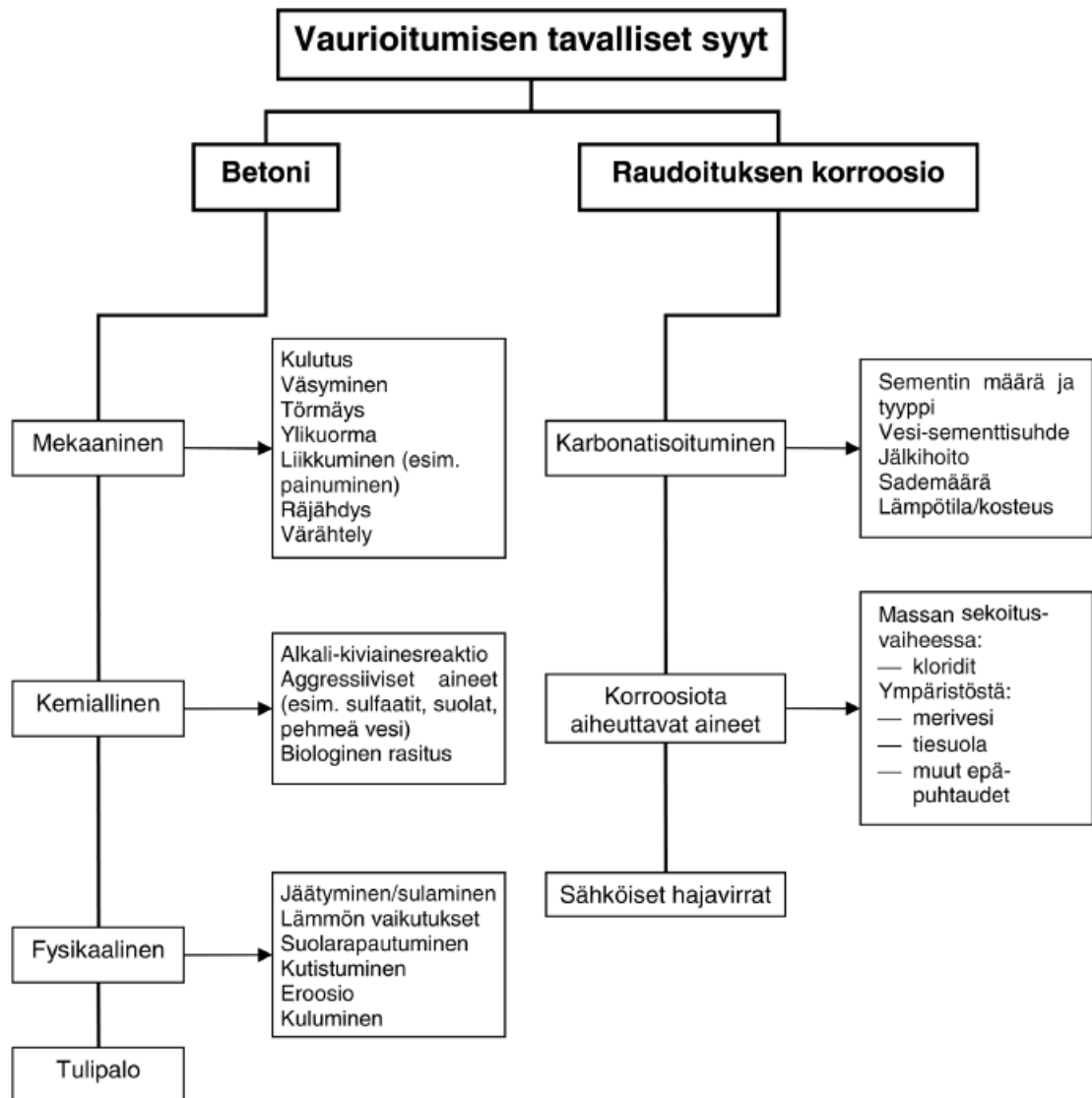
Sillan päällysrakenteeksi katsotaan kannen kantavat rakenteet, kansilaatta ja niihin liittyvät laitteet. Yleisimpiä päällysrakenteen rakennusmateriaaleja ovat teräsbetoni, teräs ja puu. Seuraavissa alaluvuissa esitetään kolme yleisintä Suomessa käytettävää siltojen rakennusmateriaalia ja niiden vaurioitumismekanismeja siltarakenteiden näkökulmista.

#### 2.2.1 Teräsbetoni

Teräsbetonirakenteet perustuvat betonin ja teräksisen raudoituksen hyvään yhteistoimintaan. Betonin puristuslujuus on korkea ja vetolujuus on noin kymmenesosa puristuslujuudesta. Betonin matalan vetolujuuden vuoksi betonirakenteiden vetojännityksen poistoon käytetään teräsradoitusta. Teräsbetoniset sillat rakennetaan joko elementeistä tai valetaan paikallaan. Paikallaan valussa betonirakenteiden valussa käytetään yleensä puisia muotteja. Puisten muottien ansiosta teräsbetonirakenteista voidaan helposti tehdä erilaisia muotoja. Betonirakenteet suunnitellaan Eurokoodin soveltamisohjeen, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2, mukaan (Liikennevirasto 2012).

Teräsbetonisillan vaurioiden syntyyn vaikuttavat hyvin paljon betonin kestävyys ja sen raudoitukselle antama suojaava kerros. Standardi SFS EN-1504-9 (2009) jakaa teräsbetonin vaurioitumismekanismit yksityiskohtaisesti betonin vaurioihin ja raudoituksen korroosioon (Kuva 1). Näistä siltojen betonirakenteiden tyypillisimpiä vaurionaiheuttajia ovat, Liikenneviraston (2013c) Taitorakenteiden tarkastusohjeen mukaan, betonin karbonatisoituminen, kloridien tunkeutuminen betoniin, rakenteiden halkeilu sekä ve-

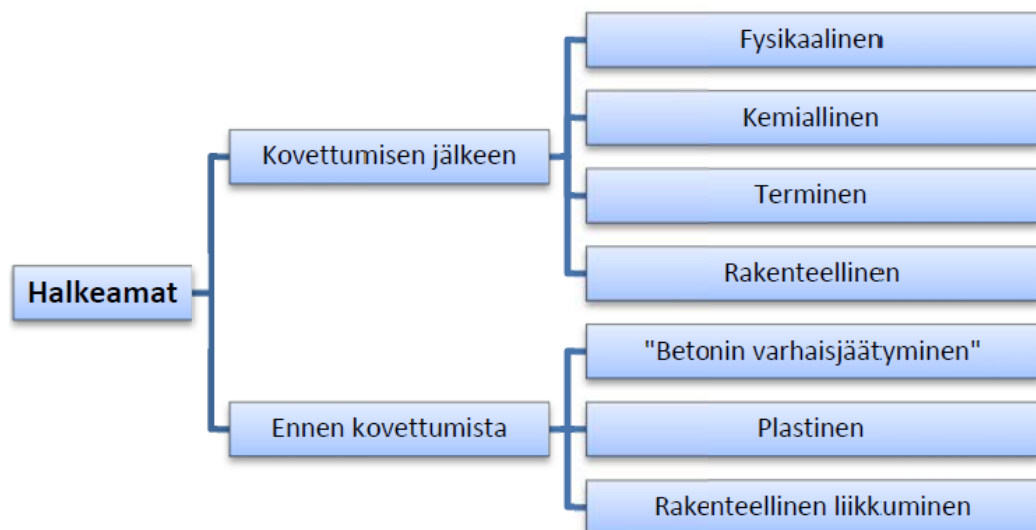
den, pakkasen ja suolojen aiheuttama rapautuminen. Betonikerroksen vaurioituessa on myös rauditus altis vaurioitumiselle eli korroosiolle.



**Kuva 1.** Teräsbetonirakenteiden vaurioitumisen tavalliset syyt (SFS EN 1504-9 2009).

Emäksinen betoni muodostaa teräksiä korroosiolta suojaavan kerroksen. Ajan myötä betonin karbonatisoituminen alentaa betonin emäksisyyttä, jolloin teräksien suojaus voi täysin kadota. Tällöin teräs voi alkaa syöpyä korroosion vaikutuksesta. Betonin karbonatisoitumista vakavampaa on raudituksen altistuminen klorideille. Raudituksen joutuessa kloridien vaikutuksen alaiseksi alkaa korrosio välittömästi, vaikka betoni ei ole karbonatisoitunut. Kloridit voivat joutua rakenteeseen betonin valmistuksessa tai ympäristöstä esimerkiksi teiden suolauksen yhteydessä betoniin tulleist halkeamista. Betonikerros voi myös kulua mekaanisten kuormien tai pakkasrasituksen vuoksi liian ohueksi ja näin altistaa rauditukset nopeammin korroosiolle. Pakkasrasituksessa betonin huokosiin tunkeutuva vesi laajenee jäätyessään aiheuttaen betonin lohkeilua.

Betoni halkeilee, kun rakenteen todellinen vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden. Halkeamat vaikuttavat betonirakenteen vesitiivyyteen ja jäykkyyteen. Betonirakenteet halkeilevat monien syiden vuoksi. Taitorakenteiden tarkastusohje käyttää Kuva 2 mukaista jaottelua halkeamien syntyajoille ja syille. Halkeilua tapahtuu ennen ja jälkeen betonin kovettumisen. Suurin osa halkeamista syntyy hyvin lyhyessä ajassa betonin valamisen jälkeen. Syitä tähän ovat betonin varhaisjäätyminen, plastinen painuminen ja kutistuminen sekä rakenteellinen liikkuminen. Plastisen painuman aiheuttaa liiallinen vedenerottuminen ja liian nopea kuivuminen, joka on myös plastisen kutistumisen aiheuttaja. Rakenteellisella liikkumisella tarkoitetaan perustusten ja muottien liikkumista. Betonin kovettumisen jälkeen halkeilun yleisiä syitä ovat kuivumiskutistuma (fysikaalinen), raudoituksen korroosion aiheuttama sisäinen paine (kemiallinen), jäätymissulamiskausjaksot (terminen), tilapäinen ylikuormitus ja viruma (rakenteellinen). (Tiehallinto 2002, s. 4-5) Viruma on pysyvä muodonmuutos, joka aiheutuu rakenteeseen kohdistuvista jatkuvista kuormista (Siikanen 2009, s. 149).



**Kuva 2.** Halkeamien jako syntyajan ja aiheuttajien suhteen (Liikennevirasto 2013c).

### 2.2.2 Teräs

Teräs on homogeeninen ja isotrooppinen materiaali, jolloin sen lujuusominaisuudet ovat suunnasta riippumattomia. Sillä on suuri veto- ja puristuslujuus ja se on erittäin kimmoisen. Suojaamattomana teräs on altis korroosiolle. Toistuvissa kuormitustilanteissa teräs väsyä aiheuttaen materiaaliin säröjä. (Siikanen 2009)

Kuva 3 on esitetty teräsrakenteiden vaurionaiheuttajat. Teräsiltojen tyypillinen vaurioituminen johtuu korroosiosta ja väsymisestä. Sekä korroosio että väsyminen ovat hitaita prosesseja, jotka voivat hoitamattomina johtaa sillan rakenneosan kantavuuden menettämiseen. Korroosion välttämiseksi tulisi teräs suojata pinnoittamalla tai käyttämällä



säänkestävää terästä. Pinnoittaminen tapahtuu käyttämällä maali- tai sinkkipinnoitteita tai näiden yhdistelmiä. (Liikennevirasto 2013c)

Liikenteen lisääntyminen ja raskaan liikenteen suurimpien sallittujen akseli- ja kokonaispainojen kasvaminen aiheuttavat siltarakenteisiin yhä suurempia rasituksia. Teräsrakenteeseen toistuvasti kohdistuvat liikennekuormat (dynaaminen kuormitus) aiheuttavat teräksen väsymistä. Väsymisen todennäköisyyttä edistävät muun muassa teräслиitosten epäjatkuvuuskohdista ja muista kiinnityksistä aiheutuvat jännityskeskittymät. Liitokset voivat heiketä materiaalin väsymisen lisäksi niittien murtumisen tai ruuvien löysytymisen vuoksi (Liikennevirasto 2013c). Myös teräkseen mekaanisesti aiheutunut lovi tai sisäinen jännityshuippu toistuvine kuormituksineen heikentävät rakenteen toimivuutta. (Vähäaho 1989 s. 102)



**Kuva 3.** Teräsrakenteiden yleisimmät vaurionaiheuttajat (Liikennevirasto 2013c).

### 2.2.3 Puu

Puu on ortotrooppinen materiaali, jonka vuoksi sen lujuusominaisuudet ovat erilaiset eri suunnissa. Puun tapauksessa se tarkoittaa alhaista leikkaus- ja vetolujuutta syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa verrattuna syiden suuntaiseen puristus- ja vetolujuuteen. (Kortesmaa 2007) Suhteutettuna painoon liimapuu on lujempaa kuin teräs (Kekki 2013). Puun etuja ovat sen edullisuus, esteettisyys ja ekologisuus. Puun haittoina on sen huono mekaaninen kulutuskestävyys ja orgaanisuus. Orgaanisuuden vuoksi puu on herkkä biologisille vaurion aiheuttajille (lämpö- ja uv-säteily, bakteerit, home-, sinistäjä- ja lahottajasienet sekä tuhohyönteiset), jotka vaikuttavat sen ominaisuuksiin. Puumateriaalia voidaan kuitenkin suojata kemiallisesti tai lämpökäsittelemällä. (Siikanen 2009)

Puu oli yleinen sillanrakennusmateriaali vielä 1960-luvulle saakka sen helpon saatavuuden ja työstettävyyden vuoksi. Nykyiset käytössä olevat puusillat on tehty pääasiallisesti pyörö-, liima- tai kertopuusta. Yleisesti puusillat sijaitsevat alemmalla tieverkolla ja metsäautoteillä poissa suurimpien kuljetusten reiteiltä. (Liikennevirasto 2015b) Tällä hetkellä puusilloja rakennetaan vähän muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna. Puurakenteet suunnitellaan Eurokoodin soveltamisohjeen, Puurakenteiden

suunnittelu – NCCI 5, mukaan (Liikennevirasto 2013a). Uusia, eurokoodien mukaan suunniteltuja puisia tyyppisiltoja on tuotu markkinoille.

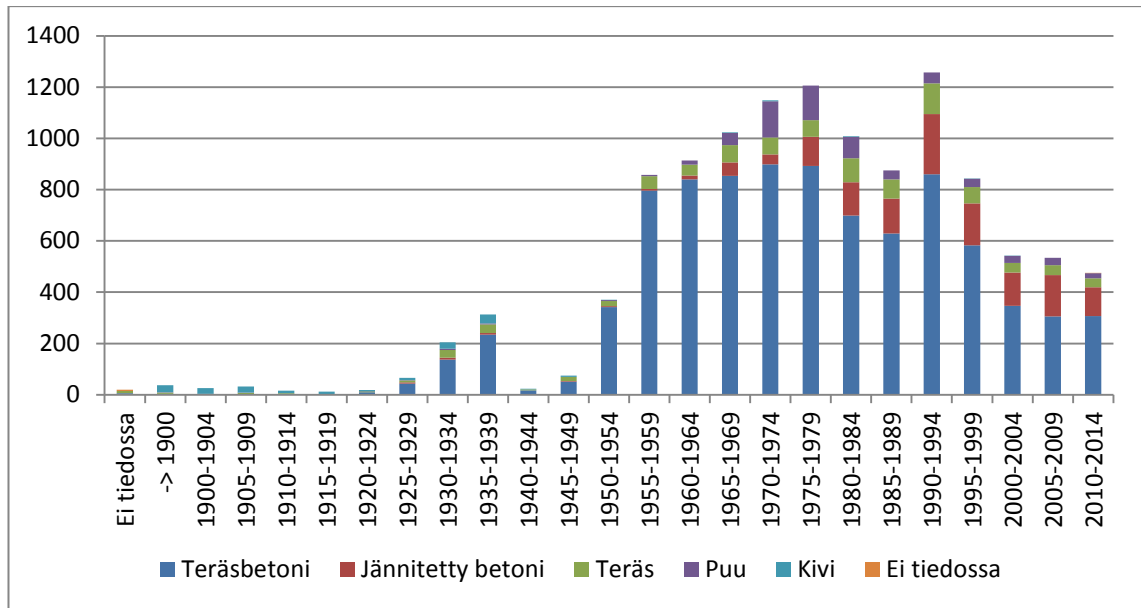
Puusiltojen vaurioituminen johtuu pääasiassa kosteuden aiheuttamasta lahoamisesta. Kosteuden tunkeutuminen puurakenteen sisään voi pitkän ajan kuluessa hoitamattomana heikentää puusillan kantavuutta. Liitoksissa käytetään metallisia liittimiä ja kiinnitystarvikkeita, jotka on suojattava korroosiolta pinnoittamalla tai käyttämällä säänkestävää terästä. Puusiltojen liittimet kärsivät samoista vaurioitumismekanismeista kuin terässiltojen liitokset. Lisäksi liitoskohdissa saattaa esiintyä puun halkeilua ja koko liitoksen löystymistä. (Liikennevirasto 2013c)

## **2.3 Ikäjakauma rakennusmateriaaleittain**

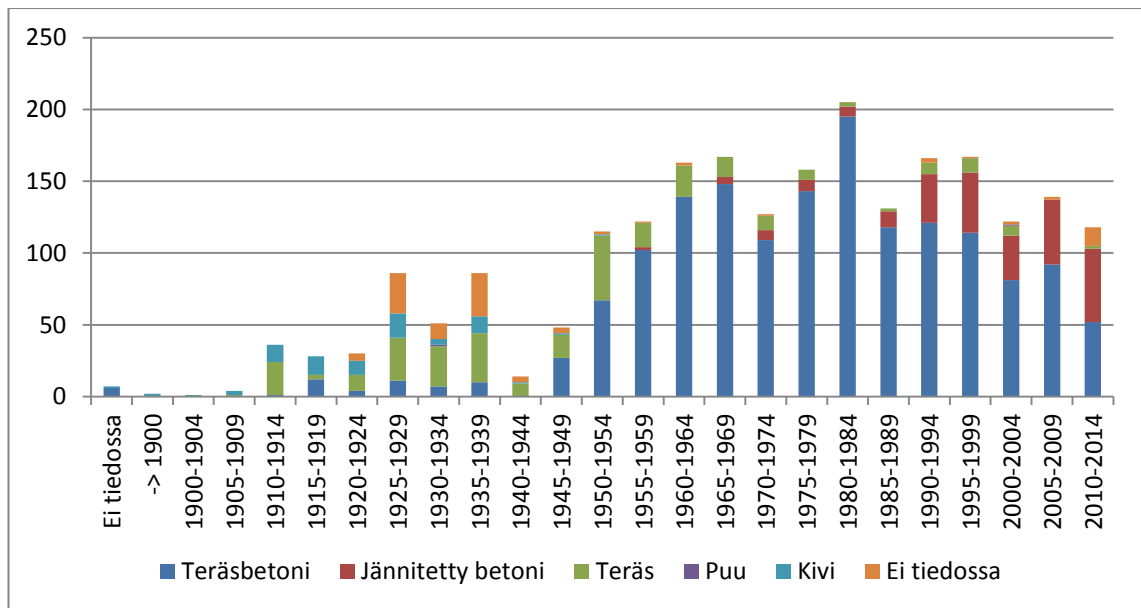
Liikenneviraston hallintaan kuului vuoden 2015 alussa 15122 tiesiltaa ja 2375 kiskoliikenteen rautatiesiltaa. Kuva 4 Kuva 5 on esitetty varsinaisten tie- ja rautatiesiltojen ikäjakaumat rakennusmateriaaleittain. Varsinaisia siltoja ovat kaikki muut sillat lukuun ottamatta putkisiltoja. Käytetyin rakennusmateriaali on selvästi ollut teräsbetoni sekä tie- että rautatiesilloissa.

Siltojen rakentaminen on ollut vahvaa 1950-luvun lopulta aina 1990-luvun lopulle asti. Varsinkin 1960-luvulla tiesiltojen rakentamista vauhditti Suomen nopea autoistuminen. 2000-luvulla uusia rautatiesiltoja on rakennettu vielä huomattavasti uusien ratahankkeiden vuoksi (Lahden oikorata ja Seinäjoki-Oulu-ratahanke). Sitä vastoin tiepuolella uudisrakentaminen on hidastunut rahoituksen suuntautuessa väylien korjaus- ja ylläpito-hankkeisiin.

Käytäntö on osoittanut, että silta on peruskorjausiässä jo 30 – 40 vuoden iässä. Voimakaina rakentamisen vuosina siltoja rakennettiin vuosittain lähes pari sataa kappaletta. Siltojen korjaustarve onkin kasvanut voimakkaasti 1990-luvulta lähtien. Odotettavissa on, että korjaustarve tulee pysymään samalla tasolla jatkossakin. (Liikennevirasto 2015a).



**Kuva 4.** Tiesiltojen ikäjakauma rakennusmateriaaleittain 1.1.2015 (perustuu lähteeseen Liikennevirasto 2015a).



**Kuva 5.** Rautatiesiltojen ikäjakauma rakennusmateriaaleittain 1.1.2015 (perustuu lähteeseen Liikennevirasto 2015a).

## 2.4 Kuntotarkastukset

Siltojen kuntoa seurataan käyttöönoton jälkeen säännöllisin väliajoin tehtävillä kuntotarkastuksilla. Tarkastuksilla pyritään ohjaamaan siltojen korjaussuunnittelua ja pitämään rakenteen toiminnallisuus sille suunnitellulla tasolla henkilö- ja liikenneturvallisuuden sekä kantavuuden säilyttämiseksi. Tarkastukset jaetaan vuosi-, yleis-, ja erikoistarkastuksiin niiden laajuuden mukaan. Lisäksi voidaan suorittaa yleistarkastus laajennettuna (teräs- ja köysisillat sekä suuret vesistösillat) tai asettaa silta tehostettuun tarkkailuun.

**Vuositarkastus** on silmämääräinen tarkastustoimenpide, joka suoritetaan vuosittain. Vuositarkastuksilla pyritään havaitsemaan kaikki rakenteissa esiintyvät epäkohdat, jotka saattaisivat vaikuttaa liikenteen sujuvuuteen tai vaarantaa henkilö- ja liikenneturvallisuuden. Sen tekeminen kuuluu yleensä tien hoitourakkaan.

Pääsääntöisesti viiden (5) vuoden välein suoritettava **yleistarkastus** tehdään silmämääräisesti kaikille näkyvissä oleville rakenteille ja sitä käytetään korjausohjelmoinnin perustana. Yleistarkastuksen tavoitteina on selvittää sillan liikenneturvallisuutta, kantavuutta, säilyvyyttä ja ulkonäköä. Laajennettu yleistarkastus tehdään normaalin yleistarkastuksen sijasta joka toinen kerta teräs- ja köysisilloille sekä noin kahdeksan vuoden välein suurille vesistösilloille. Laajennetussa yleistarkastuksessa otetaan myös näytteitä, jotta rakenteen kunto saadaan riittävän hyvin selville.

**Erikoistarkastuksella** saadaan tarkempaa tietoa rakenteen kunnosta ja sen tarve määrittyy yleistarkastuksien perusteella. Erikoistarkastus tehdään lähes aina ennen korjaussuunnittelua, jonka perustana se toimii. Erikoistarkastuksessa käytetään mittaus- ja tutkimusmenetelmiä, joilla rakenteen kuntoa voidaan tarkastella pintaa syvemmältä. Tarkastustoimenpide voi keskittyä joko koko rakenteen perusteelliseen tutkimiseen tai vain tiettyyn rakenneosaan.

**Tehostettua tarkkailua** käytetään, kun halutaan sallitun kuormituksen osalta ylittää rakenteen tai sen osan laskennallinen kantavuus ja samanaikaisesti mahdollistaa sillan turvallinen käyttö. Useissa tapauksissa tehostettua tarkkailua käytetään sillan elinkaaren lopussa kuluttamalla sillan rakenne tai sen osa loppuun. Tällöin saavutetaan suurin yhteiskunnallinen hyöty, kun siltaa ei lähdetä uusimaan ennenaikaisesti. Silta voidaan asettaa tehostettuun tarkkailuun myös aikaisemmissa tarkastuksissa löydettyjen kantavuuteen vaikuttavien vaurioiden perusteella. Näitä vaurioita ovat muun muassa muodonmuutokset, halkeamat, murtumat ja syöpymät. Tehostetun tarkkailun tavoitteena on seurata edellä mainittujen vaurioiden etenemisnopeutta. Tehostettu tarkkailu voidaan suorittaa monitoroimalla sillan käyttäytymistä kiinteillä mittalaitteilla. (Liikennevirasto 2013c)

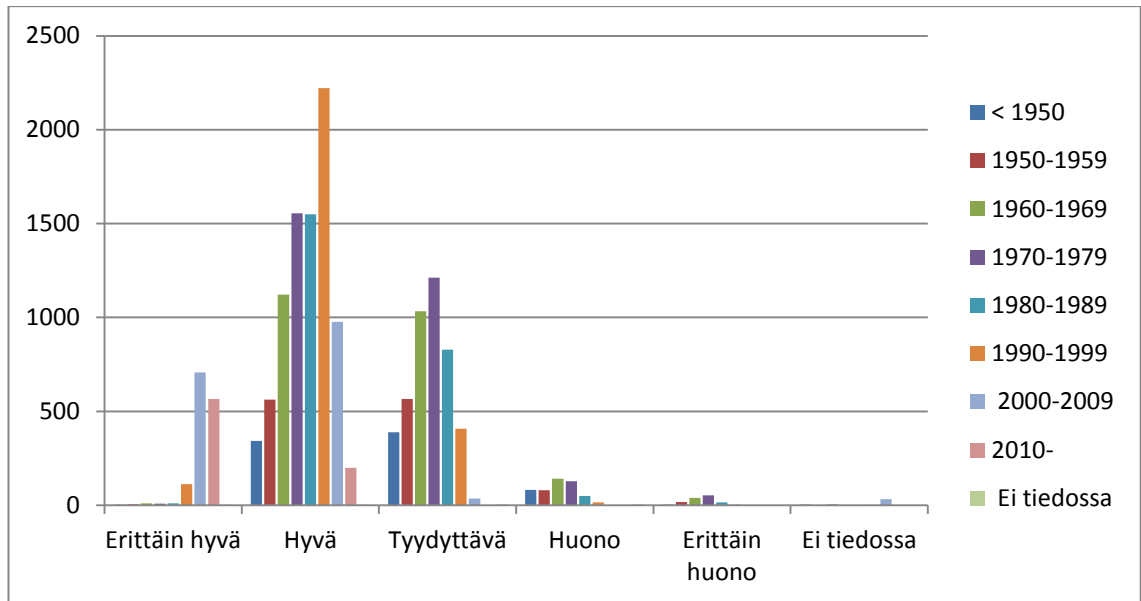
## 2.5 Siltojen kunto

Sillat jaetaan kuntoluokkiin niille tehtyjen tarkastusten perusteella. Kuntoluokat on jaoteltu Liikenneviraston (2015a) sillat julkaisun mukaan seuraavasti:

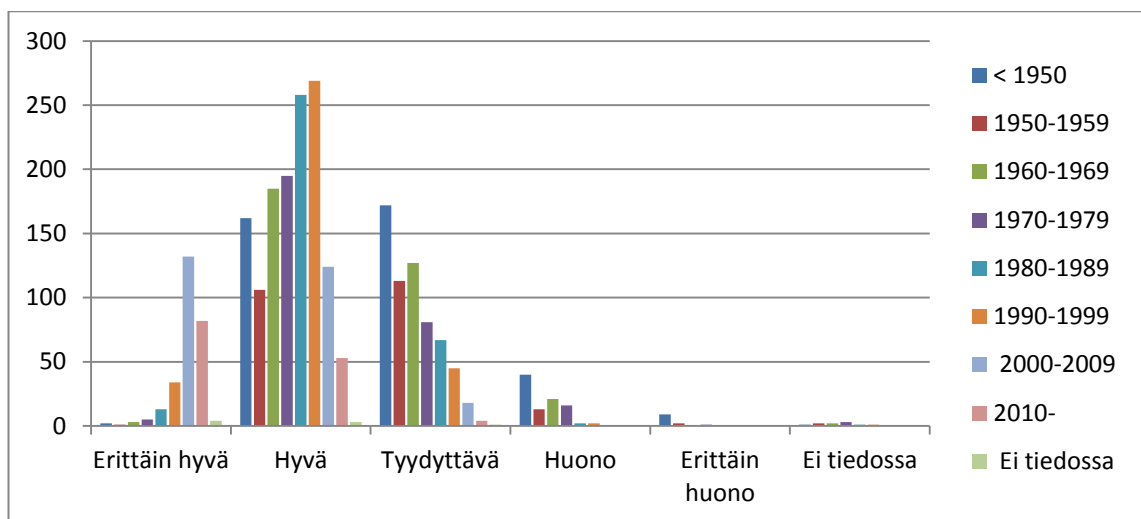
- 1 Erittäin huono – peruskorjaus myöhässä
- 2 Huono – peruskorjaus nyt
- 3 Tyydyttävä – peruskorjaus tulossa
- 4 Hyvä – vähäistä kunnostusta
- 5 Erittäin hyvä – ei ylläpitotarpeita.

Huonokuntoisiin siltoihin luetaan kuuluviksi kuntoluokissa 1 (erittäin huono) ja 2 (huono) olevat sillat. Huonokuntoiset sillat ovat kuntoluokituksen mukaan jo peruskorjauksen tai jopa uusimisen tarpeessa. Kuva 6 ja Kuva 7 on esitetty tie- ja rautatiesiltojen kuntoluokat iän mukaan vuoden 2015 alussa (myös putkisillat). Huonokuntoisia varsinaisia tiesiltoja oli 502 kpl, joista lähes puolet oli teräsbetonisia laattasiltoja (Liikennevirasto 2015a, s. 75). Putkisillat mukaan luettuna huonokuntoisia tiesiltoja oli yhteensä 637 kpl, joiden osuus koko tiesiltakannasta oli 4,2 %. Huonokuntoisia rautatiesiltoja oli 106 kpl, joiden osuus koko rautatiesiltakannasta oli 4,5 %. Taitorakenteiden yhtenäisen kuntotasotaulukon mukaan siltojen yleinen kunto oli tällöin tyydyttävällä tasolla. (Liikennevirasto 2015a)

Suomen liikenneväylillä oli vuoden 2015 lopulla noin 2,5 miljardin euron arvosta korjausvelkaa. Korjausvelka on yhteenlaskettu rahasumma, joka tarvitaan maanteiden, rautateiden ja vesiväylien infrastruktuurin kunnostamiseksi hyvälle yleiselle kuntotasolle. Tähän summaan sisältyvät myös kaikki huonokuntoiset sillat. Liikenneviraston vuonna 2011 tekemän tutkimuksen mukaan tie- ja rautatiesiltojen osuus liikenneväylien korjausvelasta oli yhteensä 14 %. Tällä osuudella siltojen korjausvelka olisi vuoden 2015 lopulla ollut noin 350 miljoonaa euroa. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2014) Liikenneviraston (2015c) Taitorakenteiden ylläpidon toimintalinjat – selvityksen mukaan siltojen vuosittainen korjausrahoitus on viime vuosina ollut noin 60 M€. Tämä rahoitus ei ole ollut riittävä pysäyttämään korjausvelan kasvua. Selvitys arvioi korjausvelan kasvun pysäyttävän rahoitustarpeen kasvavan vuoteen 2024 mennessä keskimäärin kaksinkertaiseksi nykyiseen vuosirahoitukseen verrattuna.



**Kuva 6.** Tiesiltojen kuntoluokka iän mukaan 1.1.2015 (perustuu lähteeseen Liikennevirasto 2015a).



**Kuva 7.** Rautatiesiltojen kuntoluokka iän mukaan 1.1.2015 (perustuu lähteeseen Liikennevirasto 2015a).

## 2.6 Koekuormitusmenetelmät

Sillalle suoritetaan koekuormitus, kun halutaan varmistaa rakenteen todellinen toimivuus. Silta voi olla vanha tai täysin uusi. Vanhojen siltojen osalta koekuormitustarve syntyy useimmiten alustavassa kantavuuslaskennassa, jonka perusteella sillan kantavuus raskaalle liikenteelle ja erikoiskuljetuksille on puutteellinen ja halutaan tarkennettua tietoa sillan rakenteiden todellisesta toiminnasta. Sillan tarkastuksissa on voinut ilmetä myös vaurioita, jotka edellyttävät koekuormituksen tekemisen todellisen kantavuuden

selvittämiseksi sillan turvallisen käytön jatkamiseksi. Lisäksi voidaan haluta tutkia vanhan sillan vahventamisen vaikutusta kantavuuteen. Uusissa silloissa on voitu käyttää uusia rakennemenetelmiä, joiden toimivuus pitää selvittää koekuormittamalla silta ennen sen käyttöönottoa. (Tiehallinto 2003) Siltojen monitorointien osalta koekuormitusta käytetään testikuormituksena asennettujen antureiden kalibrointiin. Kalibroinnilla etsitään antureille raja-arvoja erilaisilla kuormilla, jolloin sillalla kulkeneita ajoneuvoja voidaan luokitella kuormitusvaikutuksien perusteella (Liikennevirasto 2016a).

Koekuormituksissa sillan kuormittamiseen käytetään ajoneuvoja tai ajoneuvoyhdistelmiä, joiden akseli- ja kokonaismassat ovat tunnettuja. Kuormitusajoneuvona käytetään aina tilanteeseen sopivinta vaihtoehtoa. Tyypillinen kuormitusajoneuvo on kuorma-auto, jonka lava on täytetty soralla. Sorakuormalla ajoneuvolle saadaan helposti haluttu kokonaispaino ja kuorma saadaan jaettua halutulla tavalla eri akseleille. Lisääntyvä tarve tutkia siltojen kantavuuksia erikoiskuljetuksille on lisännyt erikoiskuljetusajoneuvojen käyttöä koekuormituksissa niiden suuremman akselimäärän vuoksi. Tällöin käytetään koekuormitusajoneuvoina useimmiten lavetteja, joiden kuormana on esimerkiksi betonielementtejä tai teräslevyjä. Murtokokeet suoritetaan turvallisimmin käyttämällä hydraulisia tunkkeja. (Tiehallinto 2003)

### 2.6.1 Staattinen kuormituskoe

Staattinen kuormituskoe on yleisin siltojen kuormituskoemenetelmä. Koe suoritetaan ajamalla kuormitusajoneuvot sillan kannelle eri kuormitusasentoihin. Ajoneuvot joko pysäytetään paikalleen tai ajetaan erittäin hitaasti kuormituskohdan ohi. Jokaisen kuormitusasennon vaikutus siltaan mitataan asiaan sopivilla mittalaitteilla. Staattisella kuormituskokeella selvitetään kuormien jakaantumista sekä maksimirasituksia.

Rakenteen toimintaa selvittävä koe tehdään useimmiten yhdellä kuormitusajoneuvolla, jonka kuormituskohtaa muutetaan useassa vaiheessa sillan poikkisuunnassa käyttäen eri ajolinjoja. Poikkisuunnassa kuormitusasennot pyritään tekemään sekä keskellä siltaa että mahdollisimman lähellä sillan kaidetta (0,2 – 0,75 m). Pituussuunnassa kuormitusasennot valitaan keskimittaisilla silloilla tasaisin välein (2,0 – 5,0 m) tai siten, että kuorma aiheuttaa kriittisen vaikutuksen rakenneosaan.

Rakenneosien maksimirasitusten selvittämiseksi staattisessa kuormituskokeessa siltaa kuormitetaan usealla ajoneuvolla muutamassa eri kuormitusasennossa. Koejärjestelyllä ei pystytä mittaamaan kuormasta aiheutuvaa sysäyslisää ja siten kuormituksen dynaamisia vaikutuksia. (Tiehallinto 2003)

### 2.6.2 Dynaaminen kuormituskoe

Dynaamisessa kuormituskokeessa tutkitaan sillan dynaamista käyttäytymistä ajamalla sen yli yhdellä kuormitusajoneuvolla. Yliajon aiheuttamaa kuormitusta mitataan jatku-

vasti vähintään 50 Hz taajuudella. Kuormitusajoneuvon ajonopeuksia, -suuntia ja -linjoja muutetaan eri mittausten välillä rakenteen todellisen toiminnan selvittämiseksi. Yliajojen lisäksi voidaan tehdä jarrutuskokeita todellisten liikenteestä aiheutuvien vaakakuormien selvittämiseksi (Liikennevirasto 2016b, s. 35). Mittaustuloksista saadaan määritettyä ajoneuvokuormasta aiheutuva sysäyslisä ja sillan ominaistaajuus.

Dynaamisella kuormituskokeella selvitetään kuormituksen siltaan aiheuttamia värähtelyjä ja niiden vaikutuksia rakenteisiin. Sysäyslisä saadaan määritettyä vertailemalla dynaamisen ja staattisen koekuormituksen tuloksia keskenään. Jos sillan ominaistaajuus muuttuu pidemmän ajan kuluessa, voi se ilmaista sillan rakenteessa ja siten kantavuudessa tapahtuneista muutoksista Koejärjestelyn ongelmana on kuormitusajoneuvon aseman tarkka määrittäminen eri kuormitustilanteissa. (Tiehallinto 2003)

### 2.6.3 Muut koekuormitustyytit

**Pitkäaikaiskokeita** on tehty viimeksi 80-luvulla. Se on nykyisin harvemmin käytetty koekuormitustyyppi sen pitkän keston vuoksi. Kokeen suoritus aika määrytyy sillan rakennusmateriaalin mukaan, joka on kaksi kertaa täyden kuorman vaikutusaika. Kokeen aikana koko silta on suljettu liikenteeltä. Esimerkiksi teräsrakenteisilla silloilla vähimmäisvaikutusaika on yksi tunti, kun se puurakenteisilla silloilla on 72 tuntia. Koekuormitusjärjestelyssä siltaa kuormitetaan vähintään viidessä kuormitusaskeleessa ja mitataan muodonmuutosten ja venymien suuruuksia. Mittaustulosten perusteella voidaan määritellä kimmoisen muodonmuutosten osuutta tarkastelluissa rakenneosissa. (Tirkkonen & Juntunen 1995; Tiehallinto 2003)

**Toistuvan kuorman kokeessa** tavoitteena on kuormittaa siltaa 20 % laskentakuormaa suuremmalla massalla. Koe jäljittelee pitkäaikaiskokeen kuormaa toistamalla lyhyt aikaista kuormaa viisi kertaa. Kokeella selvitetään betonisiltojen kelpoisuutta käyttörajatilan kuormille. Nykyään toistuvan kuorman kokeen suorittamisella on suuri riski vaurioittaa sillan rakenteita yhä kasvavien ajoneuvojen suurimpien sallittujen kokonaismassojen vuoksi. (Tiehallinto 2003)

**Murtokokeissa** selvitetään rakenteen todellinen toiminta ja kestävyys. Kokeessa sillan rakennetta kuormitetaan niin suurella voimalla, että sen kantokyky pettää. Kuormituskokeen luonteen vuoksi murtokokeita suoritetaan vain liikennekäytöstä poistettaville silloille. Erityisesti vanhoja puusiltoja on ennen uusimista koekuormitettu murtoon asti todellisten ja laskennallisten kantavuuksien vertailemiseksi (Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus 2014). Murtokokeissa käytetään yleensä hydraulisia tunkkeja, jotka ankkuroidaan maahan terästankojen välityksellä sillan kanteen porattujen reikien kautta. (Liikennevirasto 2016b, s. 34)



## 2.7 Kantavuustarkastelu

Siltojen kantavuustarkastelu suoritetaan vuonna 2015 päivitetyn kantavuuslaskentaohjeen mukaan. Ohje ottaa huomioon eurokoodit ja niiden kansalliset liitteet sekä 1.10.2013 voimaan tulleen ajoneuvoasetuksen muutosten vaikutukset liikennekuormiin. Ohje on tarkoitettu laskennallisten kantavuuksien määrittämiseen olemassa oleville tie-, katu- ja rautatiesilloille. Kantavuus määritetään tavanomaiselle liikenteelle tai erikoiskuljetuksille. Ohjeen perusteella saadaan sillalle määritettyä lujuusmalli (esim. FEM) käyttäen rakenteiden todellisia mittoja ja kuormia. Laskentaan vaikuttavat myös materiaalien laatu, ikä ja vaurioituneisuus. Rakenteeseen vaikuttavat kuormat jaotellaan pysyviin kuormiin, luonnonkuormiin ja liikennekuormiin. (Liikennevirasto 2015b)

Kantavuuslaskenta tehdään aina ennen monitoroinnin aloittamista. Kantavuuslaskennasta saatua lujuusmallia käytetään monitoroinnissa käytettävien antureiden lukumäärien, tyyppien ja sijaintien määrittämisessä. Lujuusmallia voidaan parantaa monitorointitulosten ja koekuormitusten perusteella. Tällöin on mahdollista laskea sillassa esiintyviä rasituksia myös anturittomista kohdista. Lujuusmallin avulla saadaan myös määritettyä antureille kriittisiä mittaussuureiden raja-arvoja, joiden ylittyessä monitorointijärjestelmä voidaan ohjelmoida lähettämään hälytys esimerkiksi tekstiviestillä. (Liikennevirasto 2016a, s. 55)

Kantavuuslaskennassa käytetään hyväksi varmuustarkastelua, johon kuuluu murto- ja käyttörajaatilatarkastelut. Monitoroinnin kannalta tärkeämpi rajatila on käyttörajatila, jolla varmistetaan rakenteen pitkäaikaiskestävyys, käyttömukavuus sekä ulkonäkö. Rakenteen tai rakenneosan tulee toimia normaalissa käytössä. Ulkonäöllä ei tarkoiteta esteettisiä asioita vaan liiallista taipumaa tai halkeilua, kun kyseessä on rakenteen käyttökelpoisuus. Käyttörajaatilamitoituksen pääasiallinen tarkoitus on rajoittaa rakenteen siirtymiä, värähtelyjä, betonirakenteiden halkeamaleveyksiä sekä ulkonäöllisten vaurioiden syntymistä. (SFS-EN 1990 + A1 + AC, s. 52 – 55)

Kantavuuslaskentaohje antaa raja-arvoja käyttörajaatilassa betonirakenteen jännityksille ja halkeamaleveyksille. Edellä mainittuja suureita voidaan monitoroinnilla mitata ja verrata laskentamalliin. Halkeamaleveydet ( $w_k$ ) rajoitetaan kuormituksen perusteella (Kuva 8). Esimerkiksi jännittämättömälle teräsbetonisillalle ajoneuvoasetuksen mukainen kuorma saa aiheuttaa 0,35 mm halkeaman. Valvotulle erikoiskuljetukselle halkeama saa olla 0,50 mm. Kantavuuslaskennassa käytettävät kuormakaaviot perustuvat Suomen teillä kulkevaan raskaaseen ajoneuvokalustoon. Ajoneuvoasetus määrää millaisilla ajoneuvoilla silloilla saa ajaa. Sillalle määritetään painorajoitus, jos se ei kantavuuslaskennan mukaan pysty kantamaan ajoneuvoasetuksen mukaista kuormaa. (Liikennevirasto 2015b)

Sallitut halkeamaleveydet jännittämättömässä teräsbetonisessa sillassa ovat	
- $w_k \leq 0,35 \text{ mm}$	ajoneuvoasetuksen ja junien kuormille
- $w_k \leq 0,35 \text{ mm}$	erikoiskuljetuksille reitistökuljetuksena
- $w_k \leq 0,40 \text{ mm}$	erikoiskuljetuksille kertakuljetuksena
- $w_k \leq 0,50 \text{ mm}$	erikoiskuljetuksille valvottuna kuljetuksena
Sallitut halkeamaleveydet jännitettyssä betonisillassa ovat	
- $w_k \leq 0,10 \text{ mm}$	ajoneuvoasetuksen ja junien kuormille
- $w_k \leq 0,10 \text{ mm}$	erikoiskuljetuksille reitistökuljetuksena
- $w_k \leq 0,20 \text{ mm}$	erikoiskuljetuksille kertakuljetuksena
- $w_k \leq 0,30 \text{ mm}$	erikoiskuljetuksille valvottuna kuljetuksena

**Kuva 8.** Siltojen suurimmat sallitut halkeamaleveydet (Liikennevirasto 2015b).

Suurimpia sallittuja taipumia tarkastellaan myös kuormituksen laadun mukaan. Taulukko 1 on listattu taipumarajat kuormitustapauksen ja sillan rakennusmateriaalin perusteella. Taulukossa AA-kaavio tarkoittaa ajoneuvoasetuksen mukaista kuormaa ja EK-kaavio erikoiskuljetuskuormaa.

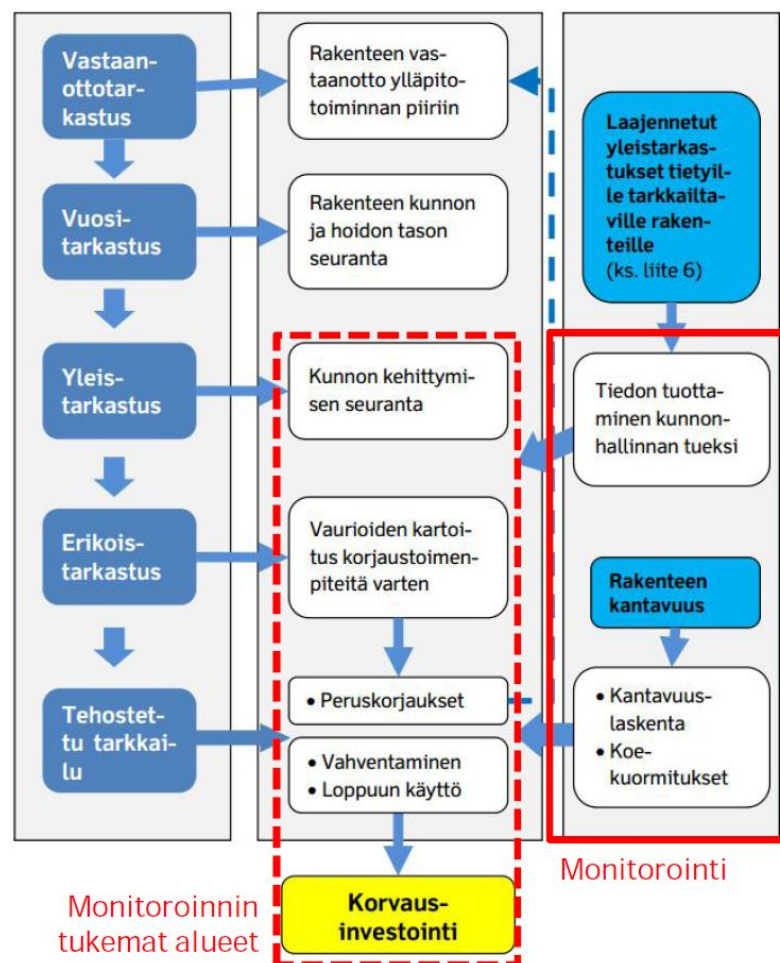
**Taulukko 1.** Siltojen kantavuuslaskennassa sallitut taipumat.  $L$  on jännemitta. (Liikennevirasto 2015b).

Rakenne	Kuorma	Sallittu taipuma kentässä
Betonisillat	1 AA-kaavio	$L/600$
	1 EK-kaavio reitistökuljetus	$L/600$
	1 EK-kaavio kertakuljetus	$L/500$
	1 EK-kaavio valvottuna	$L/400$
Teräsillat	1 AA-kaavio	$L/600$
	1 EK-kaavio reitistökuljetus	$L/600$
	1 EK-kaavio kertakuljetus	$L/500$
	1 EK-kaavio valvottuna	$L/400$
Betoni-teräsliittorakenteiset sillat	1 AA-kaavio	$L/600$
	1 EK-kaavio reitistökuljetus	$L/600$
	1 EK-kaavio kertakuljetus	$L/500$
	1 EK-kaavio valvottuna	$L/400$
Puusillat	1 AA-kaavio	$L/480$
	1 EK-kaavio reitistökuljetus	$L/480$
	1 EK-kaavio kertakuljetus	$L/400$
	1 EK-kaavio valvottuna	$L/320$

### 3. SILTOJEN MONITOROINTI

#### 3.1 Yleistä

Monitorointi on sillan tai muun taitorakenteen automaattista mittaamista erilaisten antureiden ja mittalaitteiden avulla. Monitoroinnilla saadaan numeerista tietoa sillan todellisesta kunnosta, mekaanisesta käyttäytymisestä ja ulkoisista olosuhteista. Monitorointitietoa voidaan käyttää normaalien kuntotarkastusten apuna sillan kantavuuden, käyttöiän, käyttömukavuuden ja vaurioiden määrittämisessä. Monitorointitieto ohjaa sillan korjauksen tai korvausinvestoinnin optimaalisen ajankohdan valinnassa. Kuva 9 on esitetty monitoroinnin sijoittuminen siltojen tarkastusjärjestelmässä (Liikennevirasto 2016b)



*Kuva 9. Monitorointi siltojen tarkastusjärjestelmässä (Liikennevirasto 2016b).*

Monitorointi käsittää monitorointijärjestelmän siihen liitettävien antureiden, tiedon siirron ja tallennuksen sekä mittaustiedon analysoinnin ja raportoinnin. Monitorointijärjestelmään voidaan liittää useita antureita riippuen monitoroinnin laajuudesta. Pääsääntöisesti monitorointijärjestelmä toimii itsenäisesti lähettäen mittaustiedon langattomasti järjestelmätoimittajan serverille, josta se on etäluettavissa ja analysoitavissa. Monitorointijärjestelmiin on asetettavissa myös raja-arvoja hälytyksiä varten mitattavien suureiden ylittyessä. Monitorointi voi kestää yhdestä päivästä aina useaan vuoteen. (Liikennevirasto 2016a)

Sillan kuntoon liittyvässä monitoroinnissa antureilla voidaan mitata materiaaliin liittyviä suureita kuten teräksen korroosiota, betonin halkeilua, kloridien tunkeutumista, lämpötilaa, kosteutta ja muodonmuutoksia. Lisäksi monitoroinnilla saadaan tietoa liikennemääristä ja ajoneuvoluokista (esimerkiksi BWIM-mittausmenetelmä). Sillan mekaanisen käyttäytymisen osalta monitoroinnilla pystytään seuramaan myös rakenteen taipumia, venymiä, jännityksiä, värähtelyitä, siirtymiä ja tukivoimia. Monitorointiin tarvittavat anturit voidaan asentaa jo sillan rakennusvaiheessa rakenteen sisälle tai rakentamisen jälkeen rakenteen pintaan riippuen mitattavasta suureesta. Mittalaitteita ja niiden toimintaperiaatteita on useita. Liitteessä A on esitetty siltojen monitoroinnissa käytettävien tyypillisimpien anturien ominaisuudet, mittaussuureet ja käyttökohdat. (Liikennevirasto 2016a)

### 3.2 Monitoroinnin tarpeet ja tavoitteet

Sillan monitoroinnista päätetään monitorointitarpeen mukaan. Monitorointitarve muodostuu, kun sillalle haluttu tavoitetilä ei ole saavutettavissa sen hetkisten tietojen perusteella. Kuva 10 on esitetty monitorointipolku monitorointitarpeesta haluttuun tavoitetilään. Sillan tavoitetilä riippuu monitorointitarpeesta, joka voi johtua sillan vaurioista, kantavuudesta, käyttöiästä, mukavuudesta tai alan kehittämisestä (T&K). Useimmiten monitorointitarve tulee esille sillan käytön aikana, kun sillan omistaja alkaa suunnitella sillan uusimista, vahventamista tai loppuun kuluttamista. Kuitenkin alan kehittämiseen liittyen monitorointitarve voi ilmetä jo ennen sillan rakentamista. Sillan erikoistarkastuksessa tai tehostetussa tarkkailussa voi ilmetä monitorointitarve sillan kuntoon liittyen. Kantavuuslaskennoilla tarpeet liittyvät yleensä sillan kantavuuteen. Alla kerrotaan eri monitorointitarpeiden piirteistä Kuva 10 mukaillen.

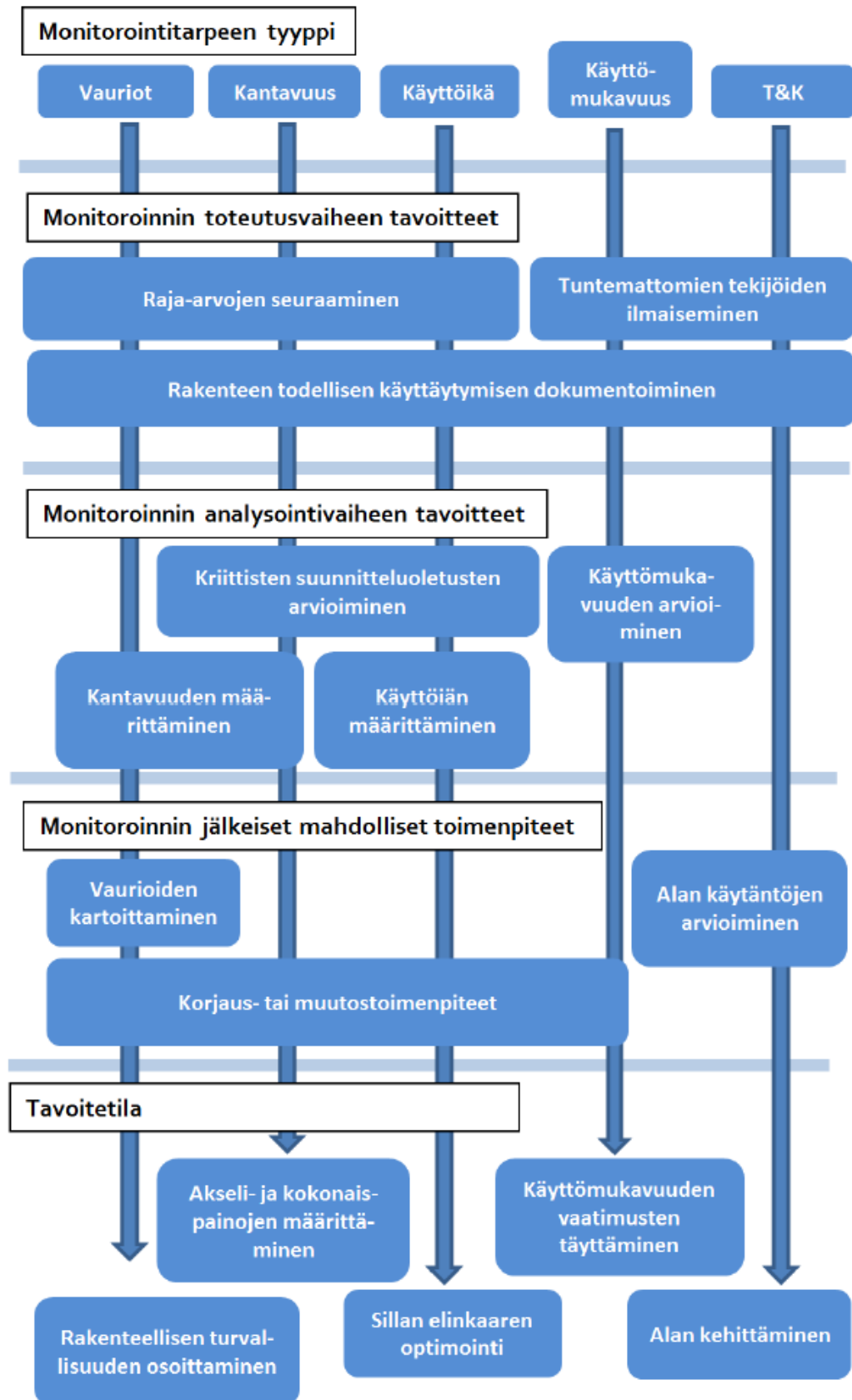
Sillassa havaittu **vaurio** voi aiheuttaa monitorointitarpeen. Yleensä tällaisessa tapauksessa vaurioiden laajuudesta ja vaikutuksista ei ole tarpeeksi tietoa, jolloin tavoitetiläksi haluttua rakenteellista turvallisuutta ei voida osoittaa. Toteutusvaiheen tavoitteena on joko rakenteen todellisen käyttäytymisen dokumentointi tai ennalta määritettyjen raja-arvojen seuranta. Jälkimmäisessä tapauksessa raja-arvot tulee olla määritetty valmiiksi määrittämällä kantavuus. Analysointivaiheen tavoitteena on useimmiten kantavuuden määrittäminen.

Monitorointitarpeen ollessa **rakenteellisen kantavuuden** selvittäminen on haluttu tavoitela yleensä sallittujen kuormien määrittäminen. Monitorointiin päädytään, kun siltarakenteen todellinen toiminta on epäselvä ja kantavuuslaskenta antaa tavoitetta alhaisemman kantavuuden. Varmuus sillan todellisesta toiminnasta ja kantavuudesta saadaan koekuormittamalla silta. Juuri uuden ajoneuvoasetuksen suurimpien sallittujen kuormien nostaminen on lisännyt tätä monitorointitarvetta, koska monet sillat on suunniteltu vanhoilla nykytarpeeseen verrattuna alhaisilla suunnittelukuormilla.

**Käyttöikä**an liittyvällä monitoroinnilla halutaan tavoitetilan (sillan elinkaaren optimointi) saavuttamiseksi tuottaa lisätietoa sillan hallittuun loppuun käyttöön, peruskorjaukseen tai korvausinvestointiin liittyen. Tällöin monitoroinnin toteutusvaiheen tavoitteena on dokumentoida sillan todellista käyttäytymistä ja analysointivaiheen pyrkimyksenä määrittää sillan jäljellä oleva käyttöikä. Monitoroinnin jälkeen voidaan sillalle tehdä korjaus- tai muutostoimenpiteitä tavoitetilan saavuttamiseksi.

**Käyttömukavuuden** monitoroinnilla halutaan täyttää käyttömukavuuteen liittyvät vaatimukset. Toteutusvaiheessa seurataan rakenteen todellista käyttäytymistä, jonka perusteella analysointivaiheessa arvioidaan sillan käyttömukavuutta. Yleensä tarve monitoroida käyttömukavuutta aiheutuu sillalla esiintyneestä epämukavasta värähtelystä.

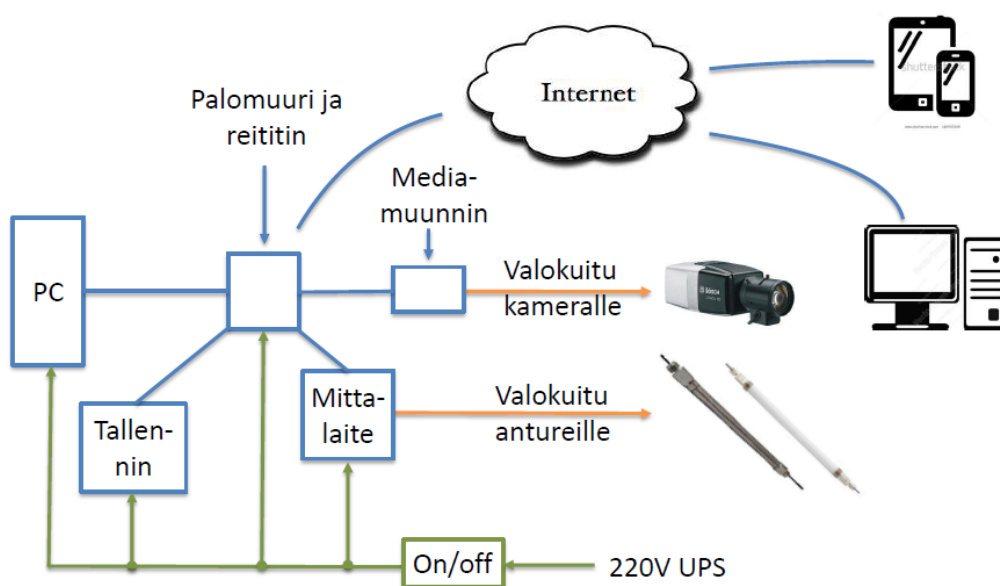
**T&K**-monitorointitarve liittyy tutkimus- ja kehittämistoiminnan monitorointeihin (mittaustekniikat, poikkeukselliset rakennetyypit, sääolosuhteet ja liikennevirrat). Tavoitetilana on yleensä alan ja suunnitteluohjeistuksen kehittäminen. Monitorointitarpeen luonteen vuoksi toteutus- ja analysointivaiheen tavoitteet määritetään projektikohtaisesti. (Liikennevirasto 2016b)



**Kuva 10.** Monitoroinnin polku monitorointitarpeesta haluttuun tavoitetilaan (Liikennevirasto 2016b)

### 3.3 Monitorointijärjestelmän rakenne

Monitorointijärjestelmien rakenteita on melkein yhtä monta kuin järjestelmätoimittajia-kin. Tässä osiossa käydään lyhyesti läpi tyypillisen monitorointijärjestelmän osat. Yleisesti ottaen monitorointijärjestelmä käsittää anturit, mittalaitteen, tiedonsiirron, signaalinkäsittelyn ja tiedonhallinnan. Kuva 11 on esitetty eräänlainen rakenne monitorointijärjestelmälle. Siltarakenteeseen kiinnitettävien antureiden lisäksi mittauspaikalla on yleensä mittauskeskussyksikkö, joka koostuu muun muassa seuraavista pääkomponenteista: **mittalaite**, **tietokone**, **tallennin**, **reititin**. Pääkomponenttien lisäksi yksikkö voidaan varustaa esimerkiksi mediamuuntimella ja virtakytkimellä. Mediamuunnin kytkee sillan liikennettä seuraavan videokameran keskussyksikköön. Tekstiviestillä toimiva virtakytkin mahdollistaa mittauskeskussyksikön uudelleen käynnistämisen vikatilanteissa.



**Kuva 11.** Erään monitorointijärjestelmän yleiskuva (Dimense Oy 2014).

Mittalaite muuntaa antureilta saatavan mittaustiedon insinööriin muotoon. Esimerkiksi kuituoptysilille venymäantureille mittalaite muodostaa kuituun menevän valosignaalin ja vastaanottaa takaisin heijastuneen valosignaalin muuttaen sen ymmärrettäväksi venymätiedoksi. Mittaustiedon tallennusta varten yksikössä on tallennin. Mittaustiedon tallennuksen tiheyttä voidaan rajata tietokoneella tapahtuvalla signaalinkäsittelyllä jo mittaussivaiheessa. Antureille voidaan esimerkiksi asettaa raja-arvoja hälytyksille ja dynaamisten tapahtumien tallentamiselle. Reititin mahdollistaa etäyhteyden ottamisen mittauskeskussyksikköön sekä mittaustiedon lähettämisen ulkopuoliseen tallennuspaikkaan, esimerkiksi järjestelmätoimittajan pilvipalveluun. Etäyhteys voi toimia mobiiliyhteydellä (3G, 4G) tai kiinteällä laajakaistalla. Etäyhteydellä antureilta saatavaa mittaustietoa voidaan tarkastella reaaliajassa. Reaaliaikainen seuranta on toteutettu internetselainpohjaisella käyttöliittymällä, jolloin se on saavutettavissa mistä tahansa ilman erillisiä ohjelmistoja.

Kaupalliset monitorointijärjestelmät eivät ole pelkästään tiedonkeruuta suorittavia mittalaitteita. Niiden mukana tulee yleensä myös analysointiohjelmistoja, joiden avulla voidaan määrittää muun muassa dynaamisten tapahtumien suuruus ja lukumäärä. Erityisesti väsytyrasiitetuille silloille (terässillat) dynaamisten tapahtumien tallentaminen on tärkeää. Dynaamisten tapahtumien perusteella voidaan myös määrittää sillan ominaisuuksia. Pääsääntöisesti mittaustieto on vietävissä halutussa muodossa (esim. ASCII) tiedostoon jälkikäsitteilyä varten.

## 3.4 Monitorointi maailmalla

### 3.4.1 Yleistä

Rakenteen kunnon monitorointia (structural health monitoring, SHM) on maailmalla tutkittu ja toteutettu useiden vuosikymmenien ajan. Monitorointi ei rajoitu vain siltoihin vaan sitä voidaan soveltaa mihin tahansa rakennelmaan (padot, tunnelit, rakennukset ja öljynporauslautat). Siltojen monitorointia on toteutettu 1980-luvulta lähtien lähinnä rakenteen käyttäytymisen ymmärtämiseksi kuormituksen alla. Viimeisen 20 vuoden aikana uusia suuria siltoja on instrumentoitu jo rakennusvaiheessa. Tämä on mahdollistanut monitorointijärjestelmien kehittämisen ja sillan käyttäytymisen ymmärtämistä eri ympäristöolosuhteissa. (Brownjohn 2006)

Kiinnostus siltojen monitorointia kohtaan on kasvanut viimeisen vuosikymmenen aikana rapistuvan infrastruktuurin vuoksi. Yhdysvalloissa aloitettiin vuonna 2005 vähintään 20 vuotta kestävä tutkimusohjelma (Long-Term Bridge Performance (LTBP) Program), joka tähtää siltojen rapistumisen ja suorituskyvyn parempaan ymmärtämiseen. Projektissa kerätään valtakunnallisesti mittaustietoa, jonka avulla voidaan tehdä ennustemalleja ja siltojen kunnonhallinnan optimoimiseksi. (Federal Highway Administration verkkosivu 2016) Yhdysvalloissa vuonna 2007 romahtaneen vilkkaasti liikennöidyn sillan tilalle rakennettiin uusi silta, johon asennettiin jo rakennusvaiheessa yli 500 anturia mittaamaan sillan rakenteellista käyttäytymistä. Sillalle suoritettiin koekuormitus lujuusmallin selvittämiseksi. Mittaustuloksia oli tarkoitus verrata suoraan lujuusmalliin reaaliaikaisesti. (French et al. 2011)

Suomessakin on huomattu monitoroinnin mahdollisuudet. Siitä osoituksena ovat siltojen monitorointiin liittyneet TEKES-rahoitteiset tutkimusprojektit, SIMO ja SITUEL, vuosien 2006 – 2013 aikana. SIMO-projektissa keskityttiin monitorointijärjestelmän ja eri anturien tutkimiseen. SITUEL-projekti oli jatkoa SIMO-projektille, mutta keskittyi mittaustiedon jatkokäsittelyyn. Mittaustiedon analysoinnin lisäksi projekteissa laadittiin aihio siltojen monitorointia käsitteleville ohjeille, jotka Liikennevirasto julkaisi vuoden 2016 alkupuoliskolla. (VTT 2008 & 2013) Liikenneviraston siltojen monitorointiohjeista on tehty omat versionsa sekä monitoroinnin tilaajille että palveluntarjoajille.



### 3.4.2 Tutkimussuunnat

Viime vuosina on tehty useita selvityksiä siltojen monitorointeihin liittyen. Gastineu et al. (2009) käsittelee raportissaan mittausmenetelmiä ja monitorointia tarjoavia yrityksiä yleisellä tasolla. Dong et al. (2010) syventyy raportissaan eri monitorointijärjestelmien toimittajiin ja antureiden toimintaan yksityiskohtaisesti. Tutkimuksen tavoitteena on ollut selvittää menetelmien soveltuvuutta kylmiin olosuhteisiin. Raportti toteaa useimpien monitorointijärjestelmien ja antureiden soveltuvan kylmään ilmastoon asianmukaisella suojauksella. Lisäksi Dong et al. kokee ongelmalliseksi, ettei tuloksia suoritetuista monitoroinneista ole useinkaan raportoitu, vaikka monia siltoja on instrumentoitu monitorointijärjestelmillä vuosien saatossa.

Viimeisen vuosikymmenen aikana on panostettu eri mittausmenetelmien kehittämiseen. Niistä kypsimpänä teknologiana voidaan mainita erilaiset kuituoptiset ratkaisut. Ensimmäisiä kokeiluja betonin jännityksen mittaamiseen valokuiduilla on tehty 1990-luvun alussa. Optisiin kuituihin perustuvien antureiden käyttö on kuitenkin lisääntynyt vasta 2000-luvun alusta lähtien tekniikan kehittyessä ja anturihintojen laskiessa. Kuituoptisten antureiden etuna on kuiduissa valona kulkeva mittaussignaali, joka ei ole herkkä sähkömagneettisille häiriöille. Lisäksi valokuiduissa ei ajan kuluessa tapahdu mittausarvoissa ajalehtimistä kuitumateriaalin vuoksi.

Kuituoptisiin ratkaisuihin perustuvia kaupallisia monitorointijärjestelmiä on tarjolla useilla eri monitorointijärjestelmätoimittajilla (mm. Osmos, Smartec, Micron Optics). Edistyneempien järjestelmien lähtökohtana on tarjota kuituoptisia ratkaisuja, jotka pystyvät mittaamaan useita suureita yhdellä ainoalla anturilla. Järjestelmiin on mahdollista liittää myös perinteisiä analogisia antureita mm. lämpötilan, tuulen ja kiihtyvyyden mittaamiseen. Monitorointijärjestelmien pyrkimyksenä on etähallita kaikkia antureita yhden käyttöliittymän kautta.

Nousemassa olevia teknologioita ovat langattomuus, mikrosysteemit (MEMS) ja kameratekniikkaan perustuva konenäkö. MEMS-teknologiaan perustuva venymä- ja siirtymäanturi on kooltaan erittäin pieni, vähävirtainen ja tarkka. Konenäöllä pystytään monitorimaan isoja alueita rakenteesta muun muassa lämmönjakautumisen ja jännitystilojen osalta. Langattomilla anturiverkoilla pyritään helpottamaan asennuksia ja pienentämään laitekustannuksia. (Webb et al. 2014)

### 3.4.3 Kustannukset

Tällä hetkellä monitoroinnin korkeat kustannukset rajoittavat sen yleistymistä. Monitoroinnin kokonaiskustannukset ovat vielä moninkertaiset verrattuna perinteisiin silmämääriäisiin kuntotarkastuksiin. Tämä johtuu pääosin monitorointijärjestelmään tarvittavasta suuresta alkupanostuksesta. (Agdas et al. 2015)

Monitorointiprojektin kustannusten suuruusluokka riippuu tyypillisesti monitoroitavasta kohteesta (muun muassa sillan koko ja siltatyyppi) sekä monitoroinnin laajuudesta ja kestosta. Monitoroinnin kustannukset koostuvat muun muassa seuraavista osatekijöistä:

- Monitorointi- ja toteutussuunnitelma
- Monitorointijärjestelmä antureineen (laajuus)
- Monitorointijärjestelmän asennus (pitkä- ja lyhytkestoinen monitorointi)
- Monitoroinnin operointi (vuosikustannukset)
- Raportointitiheys
- Lujuslaskenta.

Liikenneviraston (2016b) monitorointiohjeen mukaan monitorointimenetelmän (monitoroinnin kesto) ja monitoroinnin laajuuden valinta vaikuttavat eniten monitorointikustannuksiin. Liikenneviraston laatimat monitorointimenetelmät ja -laajuudet on esitetty luvussa 3.5.

Kiviluoma (2007) on artikkelissaan vertaillut viiden eri monitorointikohteen kustannuksia (Kuva 12). Lyhytkestoisessa monitoroinnissa ei esiintynyt suuria eroja eri monitorointitekniikoiden välillä, kun taas pitkäkestoisessa monitoroinnissa järjestelmän automatisointi ja langaton anturiverkko lähes puolitti kustannukset. Sarakkeen kaksi monitorointi perustuu kuituoptiseen venymämittaukseen. Monitorointijärjestelmän kertakustannus voi olla korkea erityisesti lyhytkestoisessa monitoroinnissa, jos sen hankinta sisällytetään kokonaisuudessaan monitorointiprojektiin. Suurimmat kustannukset tulevat useimmiten monitoroinnin jatkuvasta operoinnista.

	Automation based monitoring system	Conventional long-term monitoring system with container	Structural monitoring with wireless sensor networks	Repeated modal parameter measurements with excitator	Repeated field testing
Product development effort for the service provider	12 man months and software licenses <i>High</i>	4 man months and software licenses <i>Medium</i>	24 man months <i>High</i>	12 man months <i>Medium</i>	3 man months and software licenses <i>Medium</i>
Cost level of equipments with typical sensors	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>
Cost of installation for short-term monitoring	half day on the bridge <i>Low</i>	3 days on the bridge <i>Low</i>	half day on the bridge <i>Low</i>	half day on the bridge <i>Low</i>	2 days on the bridge <i>Low</i>
Cost of installation for long-term monitoring (including power)	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>
Operation, analysis and post-processing effort: short-term monitoring	0.5 man month <i>Low</i>	2 man months <i>Medium</i>	0.5 man month <i>Low</i>	2 man months <i>Medium</i>	2 man months <i>Medium</i>
Operation, analysis and post-processing effort: long-term monitoring	1 man month <i>Low</i>	3 man months <i>High</i>	1 man month <i>Low</i>	1 man month <i>Medium</i>	3 man months <i>High</i>
Proximate overall cost of the short-term monitoring service	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>
Proximate overall cost of the long-term (one year) monitoring service	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>

Key:

*High* cost level  $\geq$  50 000 Euro.

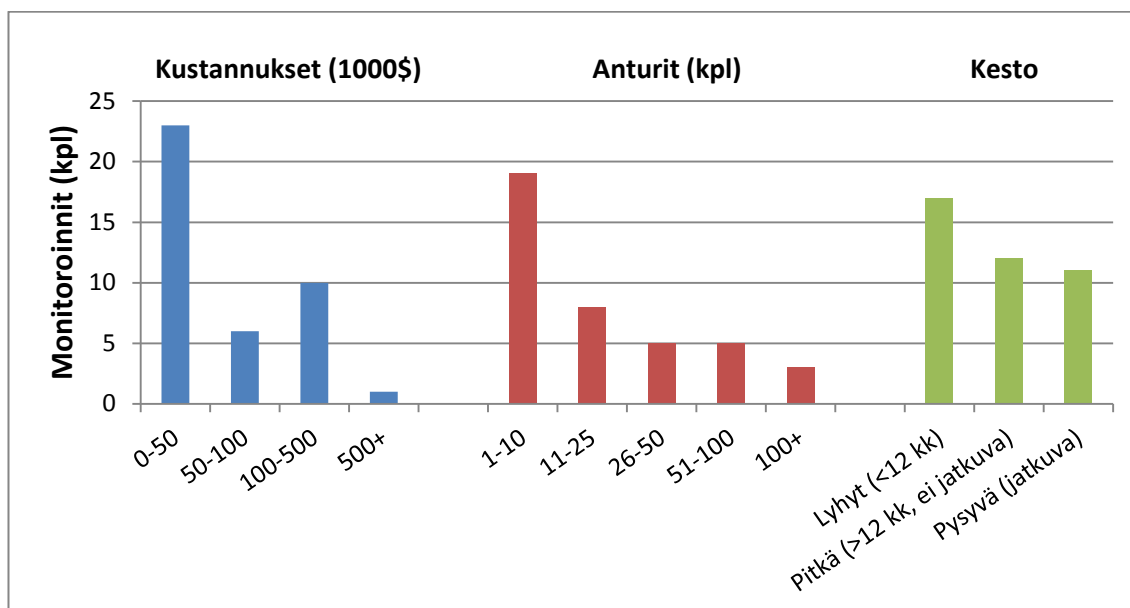
*Medium* cost level = 20 000–50 000 Euro.

*Low* cost level is < 20 000 Euro.

**Kuva 12.** Kustannusten suuruusluokka eri monitorointimenetelmillä (Kiviluoma 2007).

Inaudi et al. (2008) on koonnut yhteen monitorointijärjestelmäkehittäjä Smartecin 15 vuoden aikana suorittamat monitoroinnit (Kuva 13). Monitorointeja suoritettiin 40 eri kohteessa. Monitorointien laajuudet, kestot ja kustannukset vaihtelivat kohteen mukaan. Kustannukset sisältävät vain monitorointijärjestelmän ja sen asennuksen. Kustannuksis-

sa alle 50 k\$ monitoroinnit hallitsevat niiden lyhytkestoisuuden ja antureiden alhaisen lukumäärän vuoksi. Yli 100 k\$ monitoroinneilla pyrittiin pysyvään, autonomiseen ja etäkäytettävään monitorointiin.



**Kuva 13.** Yhteenveto Smartec-järjestelmällä suoritetuista monitoroinneista (perustuu lähteeseen Inaudi et al. 2008).

Rakenteen koko elinkaaren tapahtuvassa monitoroinnissa Kim et al. (2011) ehdottaa optimoimaan kustannukset monitorointitiedon saatavuudella. Monitorointisuunnitelmaa muutettaisiin rakenteen eliniän eri vaiheiden mukaan, jolloin monitorointitiheys (näytteenottotaajuus) olisi alhaisempi eliniän alussa ja korkeampi eliniän lopussa. Kustannusten suuruus ohjautuisi suoraan monitorointitiheyden perusteella.

Monitorointijärjestelmää ja anturitekniikkaa valittaessa on huomioitava laitekustannusten muuttuminen. Vähäisellä anturimäärällä vaihtoehto A voi olla halvempi ratkaisu kuin vaihtoehto B, mutta anturimäärän kasvaessa vaihtoehto A onkin kalliimpi ratkaisu kuin vaihtoehto B. Esimerkiksi vastusvenymäliuskojen mittalaitteeseen voi liittää vain muutamia antureita, jonka jälkeen tarvitaan toinen mittalaite lisättäessä antureita. Mittalaite maksaa useita satoja euroja. Optisia kuituantureita voidaan liittää yhteen mittalaitteeseen kymmeniä, jolloin laitekustannukset ovat alhaisemmat. (Lyöri 2016)

### 3.4.4 Kestävyys

Monitorointijärjestelmien ja antureiden pitkäaikaiskestävyydestä löytyy hyvin vähän raportoitua tietoa. Jotkin anturivalmistajat antavat antureilleen arvioita käyttöiästä kuten venymäantureiden väsymisestä. Väsymisikä kertoo kuinka monta kertaa venymäanturilla pystytään toistamaan tietyn suuruinen venymä.

Yleensä anturit asennetaan vaihteleviin ja vaativiin olosuhteisiin, joten antureiden kestävyys voidaan vaikuttaa suojaavalla koteloinnilla (Toivola 2016) Suojauksen tärkeydestä osoituksena on SITUEL-projektissa käytetyt vastusvenymäliuskat. Yksi vastusvenymäliuska oli asennettu paikkaan, joka oli suurimman osan ajasta veden varassa. Projektin aikana kyseinen venymäliuska vioittui kosteuden päästessä anturin sisään. (VTT 2013 s.15) Anturivalinnassa tulee kiinnittää huomiota anturin laatuun periaatteella ”halvalla ei saa hyvää”. Myös antureiden asennustapa vaikuttaa antureiden kestävyys- ja luotettavuuteen. Yleisesti ottaen antureiden asennuksessa pitkäaikaiseen monitorointiin olisi hyvä suosia jotain muuta kiinnitysmekanismia kuin liimausta. Pääsääntöisesti antureiden vikaantumiset ovat yksittäistapauksia. Sääasemien ongelmana ovat niitä vandalisoivat linnut. (Toivola 2016)

Kuituoptisten antureiden kestävyys pitkäkestoissa monitoroinneissa on yleisesti hyvä. Smartecin projekteissa asennuksen yhteydessä on vikaantunut 0 – 10 % antureista pääosin niiden huonon käsittelyn vuoksi. Antureiden vikaantumisprosentti monitoroinnin käyttöönoton jälkeen on ollut 1 – 2 %. Pysyvien monitorointijärjestelmien osalta vikaantumisherkimpiä ovat järjestelmien keskusyksiköt. (Inaudi 2008) Tietokoneet ja niissä oleva elektroniikka ovat kulutustavaraa, joita voi pitkissä monitoroinneissa joutua uusimaan useinkin. Lisäksi keskeytymättömän virransyötön laitteita (UPS, Uninterruptible Power Supply) vikaantuu virtapiikkien ja lämpötilavaihteluiden vuoksi. (Toivola 2016)

### 3.4.5 Haasteet

Monitoroinnin yleistymisen haasteena ovat monitoroinnin kokonaiskustannukset ja sen taloudellisten hyötyjen osoittaminen sillan omistajalle. Monitorointitarve ja monitoroinnin taloudellinen kannattavuus tulisi suhteuttaa uuden sillan investointikustannuksiin. Sillat on suunniteltu ennen 70 vuoden käyttöiälle. Nykyään rakennettaville silloille suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta (puusillat 50 vuotta). Jos halutaan lisätä sillan käyttöikää 10 vuodella, monitorointikustannukset eivät saisi olla suuremmat kuin kyseisen ajan korkokustannukset investoinnille. Toisin sanoen ”liian halpaa” siltaa ei välttämättä kannata monitoroida ollenkaan vaan investoida suoraan uuteen siltaan. Suomessa siltojen kuntotarkastuksissa ilmenevät yleisimmät siltojen kuntoon liittyvät ongelmat. Monitorointitarve tulee yleensä esille erikoistarkastuksissa. (Alajoki 2016).

Monitoroinnista saadaan valtava määrä mittaustietoa, jota ei aina osata hyödyntää. Sillasta monitoroinnin aikana saatavan mittaustiedon analysoiminen pitäisi sisällyttää monitorointiprojekteihin (Hakola 2016). On saatettu sijoittaa satoja tuhansia euroja monitorointiprojektiin, jonka tuloksena saadut mittaustiedot ovat kokonaan analysoimatta (Alajoki 2016). Paras mahdollinen hyöty monitoroinnista saataisiin vertailemalla mittaustietoja suoraan rakenteen laskettuun lujuusmalliin (Lyöri 2016). Monitorointia tilaavan tahon kannalta helpointa olisi saada kokonaisvaltaista palvelua, jossa mittaustieto raportoidaan tilaajalle valmiiksi analysoituna (Alajoki 2016). Tähän mennessä siltojen moni-

torointeihin liittyen ei ole ollut vakiintunutta käytäntöä, mikä vaikeuttaa monitorointiprojektien läpiviemistä (Toivola 2016). Tähän ongelmaan Liikennevirasto on laatinut viralliset monitorointiohjeet monitorointiprojektien yhtenäistämiseksi.

Sillan jatkuvassa monitoroinnissa mittaustietoa syntyy huomattavia määriä vuosien ajalta. Kaikkea mittaustietoa ei pystytä tai ei ole hyödyllistä säilöä pitkiä aikoja muun muassa tallennuskapasiteetin rajoittaessa. Tällöin mittaustiedon esikäsittely pitkäaikaista tallennusta varten on tärkeässä asemassa. Mittaustiedon esikäsittelyssä tulee kuitenkin olla varovainen, ettei menetetä tärkeitä tietoja. (Lyöri 2016)

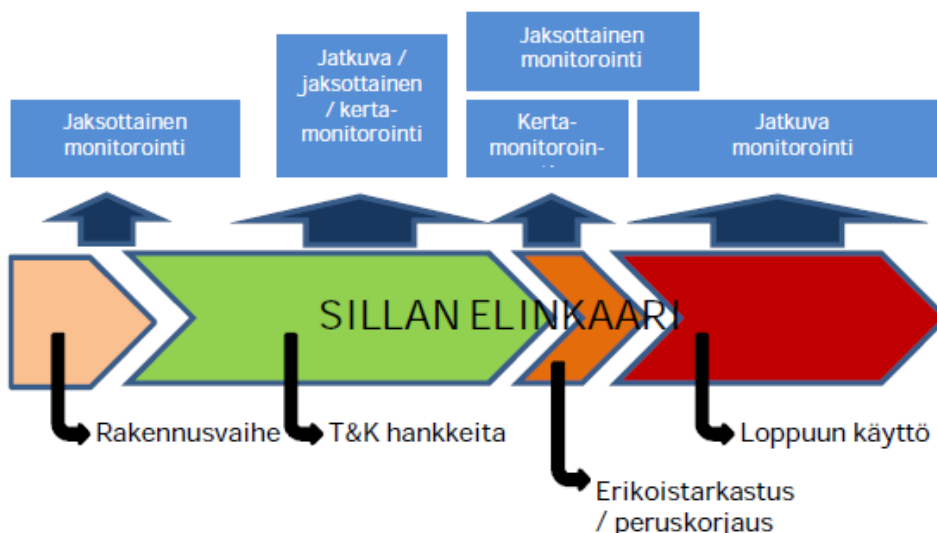
Rakenteesta mitattavan suureen ja anturin valinta tulee tehdä mittaushetken mukaan. Kokemusperäisesti on todettu, että mitattu taipuma vastaa paremmin rakenteen lujuusmallia kuin venymä. (Lyöri 2016) Tämän vuoksi mittaustiedon jälkikäsittelyssä ja analysoinnissa tulee ottaa huomioon mittausten ja lujuuslaskennan tarkkuustaso. Mittausten ja analysoinnin tarkkuudet riippuvat toisistaan ja voivat joltain osin jopa korvata toisiaan. (Hakola 2016) Tällöin antureiden ja mittalaitteiden tarkkuustaso pitäisi olla hyvin tiedossa. Erityisesti uusien mittausteknologioiden kohdalla tarkkuuden osoittaminen on koettu haasteelliseksi. (Webb et al. 2014)

### **3.5 Liikenneviraston monitorointiohjeet**

Liikennevirasto on yhteistyökumppaniensa kanssa laatinut siltojen monitorointiohjeen ja -käsikirjan aikaisempien monitorointi- ja tutkimusprojektien perusteella. Monitorointijulkaisut ohjaavat sillan suunnittelijoita, omistajia ja kunnosta huolehtivia tahoja monitoroinnin suunnittelussa ja toteuttamisessa. Tavoitteena on maksimoida monitoroinnista saatavat hyödyt sillan kunnossapito- ja korjaustoimenpiteiden ajoittamiseksi oikeaan aikaan ja taloudellisesti. (Liikennevirasto 2016a)

#### **3.5.1 Monitorointimenetelmät**

Liikenneviraston monitorointikäsikirja (2016a) jakaa monitorointimenetelmät niiden keston ja jatkuvuuden mukaan jatkuvaan monitorointiin, jaksottaiseen monitorointiin ja kertamonitorointiin. Monitorointimenetelmän valinta tehdään aina monitoroitavan kohteen ja sen rakenteista mitattavien suureiden perusteella. Valitusta monitorointimenetelmästä ei voida päätellä monitoroinnin laajuutta. Kuva 14 on havainnollistettu eri monitorointimenetelmien sijoittuminen sillan koko elinkaaren aikana.



*Kuva 14. Monitorointimenetelmien sijoittuminen sillan elinkaareissa (Liikennevirasto 2016b).*

**Jatkuva monitorointi** on sillan jatkuvaa mittaamista. Jatkuva monitorointi voi kestää useita vuosia tai jopa sillan koko eliniän ajan keskeytymättömästi. Riippuen monitoroinnin laajuudesta antureita voi olla muutamasta kappaleesta muutamaan sataan. Monitoroinnin keston ja laajuuden vuoksi mittalaitte antureineen on asennettava kiinteästi mitattavaan kohteeseen. Jatkuva monitorointi pitää olla hyvin automatisoitua, jolloin mittaustieto siirtyy langattomasti ja reaaliaikaisesti palveluntarjoajan serverille analysoitavaksi ja etäseurattavaksi. (Liikennevirasto 2016a)

Monitoroinnin pitkän keston vuoksi voidaan seurata sillan ajasta riippuvia suureita. Uusille silloille voidaan jo rakennusvaiheessa tehdä monitorointijärjestelmän vaatimat asennus- ja huoltovaraukset sekä asentaa rakenteen sisäiset anturit (esim. betonin kosteus, betoniterästen venymä). Vanhojen siltojen osalta seurataan yleensä kantavuuden heikentymisen edistymistä sillan eliniän loppuvaiheessa. Tällä tavoin silta voidaan kuluttaa turvallisesti loppuun ennen sen uusimista. (Liikennevirasto 2016a)

**Jaksottainen monitorointi** eroaa jatkuvaan monitorointiin verrattuna pääsääntöisesti sen jatkuvuudessa. Jaksottainen monitorointi voi olla kestoaltaan useita vuosia, mutta sitä ei suoriteta jatkuvasti. Monitorointi on jaettu mittausjaksoihin, jotka voivat kestää tunteista kuukausiin. Mittausjaksojen väli voi olla epäsäännöllinen. Anturimäärä on yleensä korkeintaan parikymmentä ja ne voivat olla mittalaitteita lukuun ottamatta kiinteästi asennettuja. Monitoroinnin luonne ei vaadi mittaustiedon reaaliaikaista analysointia, joten tiedonkeruu voidaan suorittaa analysointia varten manuaalisesti paikan päällä. (Liikennevirasto 2016a)

Jaksottaista monitorointia käytetään sillan rasitusten ja niistä aiheutuvien väsytskuorimien määrittämiseen. Lisäksi voidaan seurata sillan toiminnan muutosta esimerkiksi ennen ja jälkeen sillan vahventamisen. Jaksottaisella monitoroinnilla pyritään myös py-

syvien muodonmuutosten (esim. palkkien taipumat) ja liikkeiden (esim. maatuot) seurantaan. (Liikennevirasto 2016a)

**Kertamonitorointi** voidaan käsittää ominaisuuksiltaan jaksottaisen monitoroinnin yhtenä mittaussaksona. Kertamonitorointi suoritetaan vain kerran tarvittavan mittaustiedon saamiseksi myöhempää analysointia varten. Mittalaitteet ja anturit asennetaan mitattavaan kohteeseen väliaikaisesti monitoroinnin ajaksi. Kertamonitorointia käytetään yleensä sillan koekuormituksissa, lyhytaikaisessa liikenteen aiheuttamien rasitusten mitauksissa, yksittäisten vaurioiden mittaamisessa ja raskaan erikoiskuorman seurannassa. (Liikennevirasto 2016a)

Taulukko 2 on esitetty yhteenvedo monitorointimenetelmien keskeisistä piirteistä.

**Taulukko 2.** *Yhteenvedo monitorointimenetelmien keskeisistä ominaisuuksista.*

Monitorointimenetelmä	Kesto	Anturimäärä	Anturien asennus	Tiedonsiirto
Jatkuva	Pitkä	3...	Kiinteä	Automaattinen
Jaksottainen	Pitkä	...20	Kiinteä	Autom./man.
Kerta	Lyhyt	...~30	Väliaikainen	Manuaalinen

Monitorointimenetelmän valintaan vaikuttavat käytännössä muun muassa seuraavat tekijät:

- Onko kyseessä uusi vai vanha silta?
- Mitkä ovat sillan monitorointitarpeet?
- Mikä on sillan haluttu tavoitela?
- Mikä on sillan arvioitu jäljellä oleva käyttöikä?
- Mikä on monitoroinnin kustannusten suuruusluokka?
- Miten nopeasti monitoroinnilla saatavaa uutta tietoa tarvitaan päätöksentekoon?

### 3.5.2 Monitoroinnin laajuus

Monitoroinnin laajuus ilmaisee kuinka paljon täysivaltaiseen monitorointiin käytetään resursseja. Näitä resursseja ovat monitoroinnin suunnittelu, toteuttaminen ja tulosten analysointi. Laajuus rajaa myös osaltaan käytettävän monitorointitekniikan ja anturien lukumäärän. (Liikennevirasto 2016a) Monitoroinnin laajuudet jaetaan erikoislaajaan, laajaan ja suppeaan monitorointiin.

**Erikoislaajaa monitorointia** käytetään rakenteeltaan vaativissa ja pitkissä silloissa, joiden monitorointiin tarvitaan useimmiten yli 100 anturia. Monitoroinnin tarkoituksena on sillan toiminnan ja rasitusten mittaaminen kaikista sen osista, jotta sillan todellinen käyttäytyminen saadaan perusteellisesti selville. Mittausten paremman luotettavuuden saavuttamiseksi monitoroinnissa voidaan käyttää erilaisia antureita saman ilmiön mit-



taamiseen. Monitoroinnin pitkäkestoisuuden vuoksi anturit on asennettava kiinteästi mitattavaan rakenteeseen. Monitorointimenetelminä käytetään joko jatkuvaa tai jaksotusta monitorointia. Mittaustieto lähetetään automaattisesti monitorointijärjestelmän serverille analysointia varten. (Liikennevirasto 2016a)

**Laajassa monitoroinnissa** mittaushoiteena on rakenteeltaan melko vaativa ja jänteeltään pitkä silta. Yleensä ei mitata koko siltaa, jos tutkittava ilmiö on paikannettu tarkemmin johonkin sillan osaan tai rakenteeseen. Tällöin monitorointiin tarvittava anturimäärä vaihtelee 20 – 100 kappaleessa. Laaja monitorointi kestää yleensä myös pitkään, joten anturit ja mittalaitteet on asennettava kiinteästi mittaushoiteeseen ja tiedonsiirto on hoidettava automaattisesti. (Liikennevirasto 2016a)

**Suppeassa monitoroinnissa** mitataan vain tiettyä kohtaa sillasta kuten vaurio- tai rakennekohtaa. Yleisin syy suppealle monitoroinnille on kasvaneesta liikennekuormasta aiheutuvien rasitusten mittaus tietyssä sillan rakenneosassa. Kuormituksenä käytetään pääasiallisesti vain kuormitusajoneuvoja, joiden massat ovat tunnettuja. Mittalaitteet ja anturit (maksimissaan 20 kpl) asennetaan vain monitoroinnin ajaksi. Tiedonkeruu voidaan suppeassa monitoroinnissa hoitaa paikan päällä monitorointijärjestelmän muistista. (Liikennevirasto 2016a)

Taulukko 3 on esitetty yhteenveto monitoroinnin laajuuksien keskeisistä piirteistä.

**Taulukko 3.** *Yhteenveto monitoroinnin laajuuksien keskeisistä ominaisuuksista.*

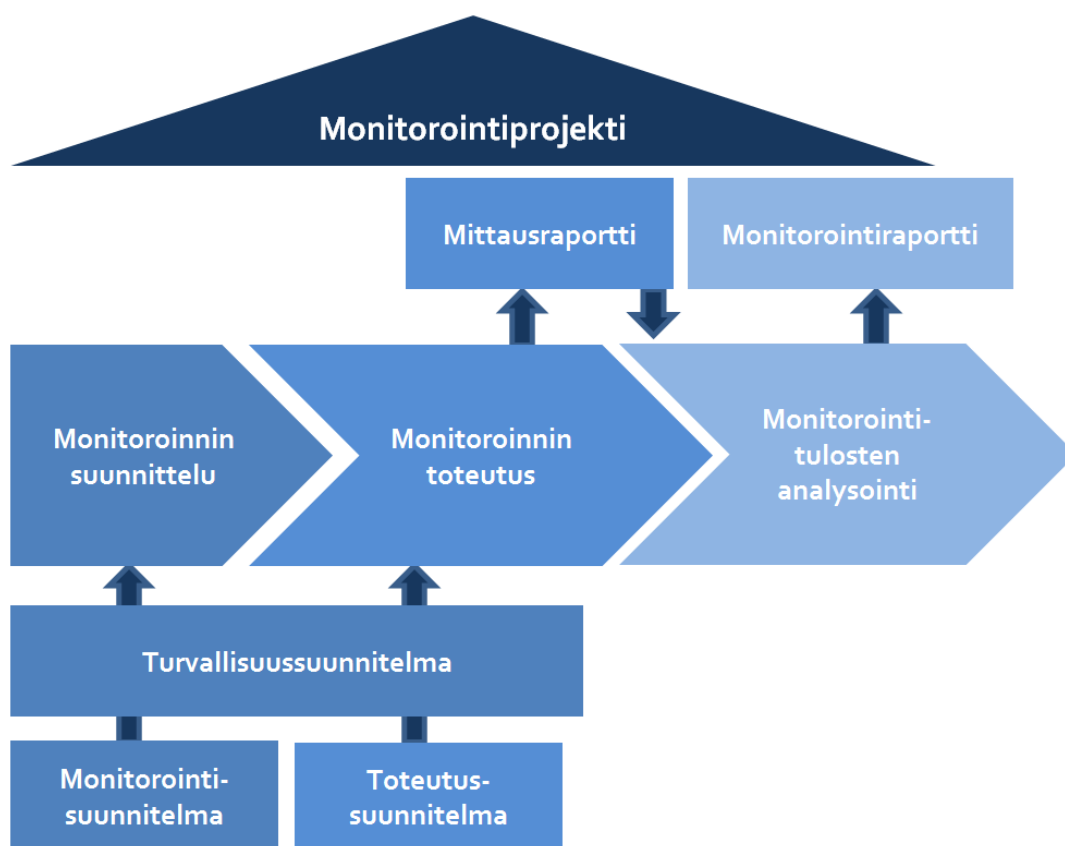
Monitoroinnin laajuus	Kesto	Anturimäärä	Anturien asennus	Mittaushoite	Tiedonsiirto
Erikoislaaja	pitkä	> 100	Kiinteä	Useita	Automaattinen
Laaja	pitkä	20...100	Kiinteä	Useita/yksi	Automaattinen
Suppea	lyhyt	...20	Väliaikainen	yksi	Manuaalinen

### 3.5.3 Monitorointiprojekti

Monitorointiprojekti sisältää yksityiskohtaiset tiedot yhden sillan monitoroinnin läpiviennistä. Monitorointiprojektilla pyritään tuottamaan avustavaa tietoa, jotta monitoroinnille asetetut tavoitteet olisivat paremmin saavutettavissa. Kuva 15 on esitetty monitorointiprojektin vuokaavio. Monitorointiprojekti koostuu kolmesta monitoroinnin päävaiheesta: suunnittelu, toteutus ja tulosten analysointi. Vuokaaviosta ilmenevät myös päävaiheisiin liittyvät asiakirjat. Näiden lisäksi monitorointiprojektiin kuuluvat osapuolten väliset sopimukset.

Monitorointiprojektin pääosapuolia ovat monitoroinnin tilaaja, pääsuunnittelija, toteuttaja ja tulosten analysoija. Lisäksi monitorointiprojektiin voi kuulua tilaajan monitorointikonsultti ja turvallisuuskordinaattori. Monitorointiprojekti voidaan toteuttaa vaiheittaisena, keskitettynä tai hajautettuna. Toteutusmuodon valintaa ohjaavat käytettävä mo-

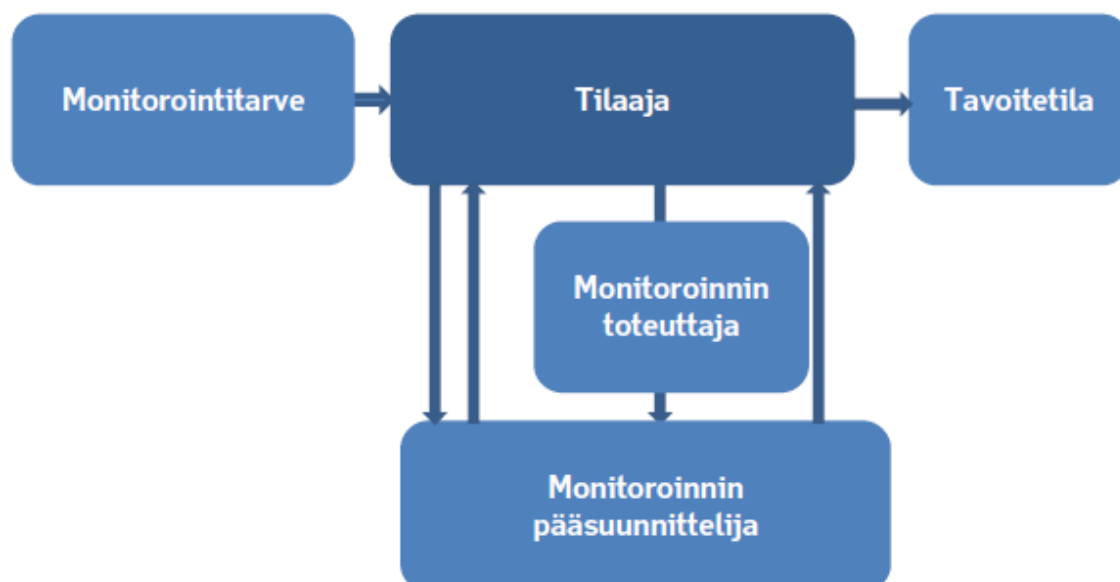
monitorointimenetelmä, monitoroinnin kesto ja siihen hyödynnettävät resurssit. Valittu toteutusmuoto määrittää monitorointiin osallistuvien osapuolten tehtävät. (Liikennevirasto 2016b)



*Kuva 15. Monitorointiprojektin päävaiheet ja siihen kuuluvat asiakirjat (Liikennevirasto 2016b).*

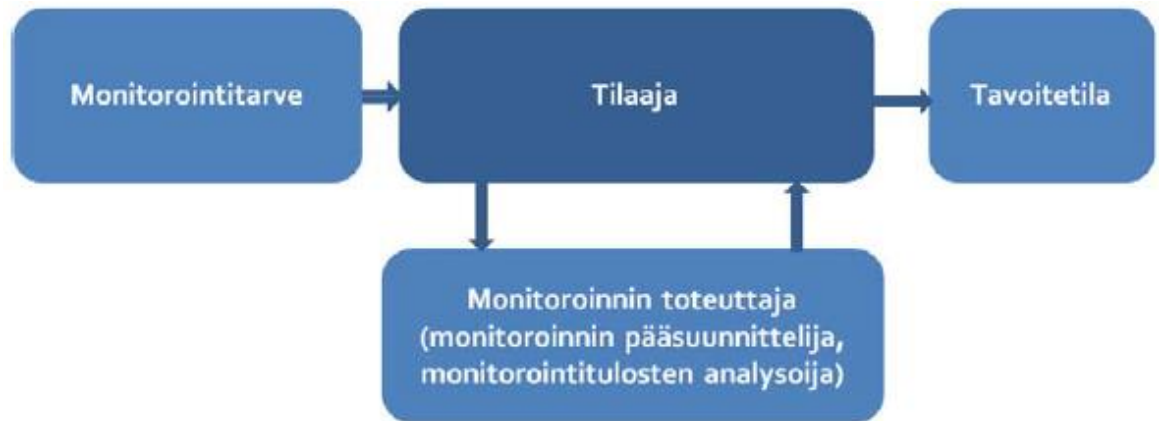
**Tilaaja** on yleensä sillan omistaja tai ylläpitäjä. Se johtaa monitorointiprojektia ja päättää monitoroinnin aloittamisesta monitorointisuunnitelman perusteella. Tilaaja asettaa monitorointiprojektille halutut tavoitteet. Tilaajan kuuluu myös tarkastaa turvallisuusohjeet ja hyväksyä monitorointiprojektin suunnitelma-asiakirjat. **Monitoroinnin pääsuunnittelija** on monitoroinnin ja monitoroitavan sillan asiantuntija. Se laatii monitorointisuunnitelman monitorointiohjeiden mukaisesti sekä analysoi monitorointitulokset ja ehdottaa niiden perusteella jatkotoimenpiteitä. Jos tarkastelun alla on sillan kantavuus tai käyttöikä, tulee pääsuunnittelijalla olla kyseisen siltatyypin vaatima suunnittelupätevyys. Valittaessa monitorointimenetelmää sekä monitoroinnin laajuutta ja tavoitteita, voi tilaaja käyttää pääsuunnittelijaa konsulttina. **Monitoroinnin toteuttaja** vastaa monitoroinnin toteuttamisesta monitorointisuunnitelman mukaan sekä laatii toteutus- ja turvallisuussuunnitelmat. Monitoroinnin toteuttaja raportoi monitoroinnin tulokset tilaajalle ja **tulosten analysoijalle**, joka vastaa mahdollisten jatkotoimenpiteiden määrittämisestä. Jos tarkastelun alla on sillan kantavuus tai käyttöikä, tulee monitoroinnin analysoijalla olla kyseisen siltatyypin vaatima suunnittelupätevyys. (Liikennevirasto 2016b)

**Vaiheittainen monitorointi** on monitoroinnin toteutusmuodoista kaikista yleisin. Kuva 16 on esitetty vaiheittaisen monitoroinnin pelkistetty prosessikaavio (yksityiskohtaisempi esitys prosessista löytyy liitteestä A). Vaiheittaiseen monitorointiprojektiin kuuluvat tilaaja, monitoroinnin pääsuunnittelija ja monitoroinnin toteuttaja. Vaiheittaisessa monitoroinnissa tilaaja tekee toimeksiannon monitorointisuunnitelmasta monitoroinnin pääsuunnittelijalle. Monitorointisuunnitelman perusteella tilaaja tekee päätöksen monitoroinnista ja pyytää monitoroinnin toteuttajalta monitoroinnin toteutus- ja turvallisuussuunnitelmat. Kun tilaaja hyväksyy monitoroinnin toteutus- ja turvallisuussuunnitelmat, voi itse monitorointi alkaa. Monitoroinnin toteuttaja tekee monitoroinnin tuloksista mittausraportin, jonka perusteella pääsuunnittelija analysoi mittaustulokset ja toimittaa monitorointiraportin tilaajalle. Tämän jälkeen tilaaja päättää sille tehtävistä jatkotoimenpiteistä. Suunnitelmien ja raporttien ohjeelliset sisällöt löytyvät liitteistä D-F. (Liikennevirasto 2016b)



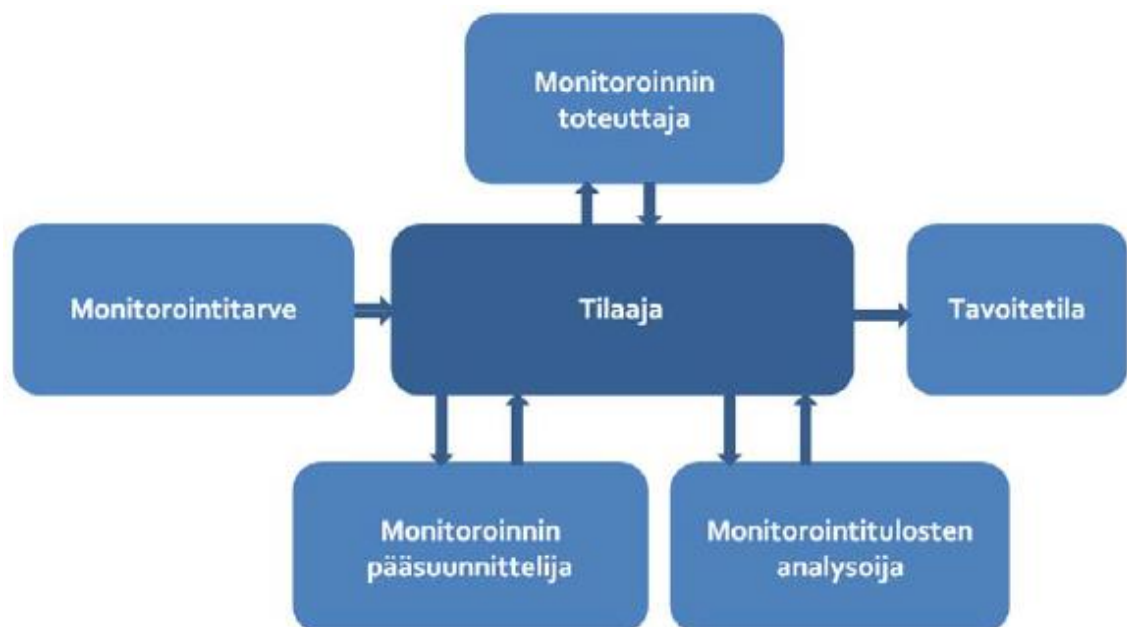
**Kuva 16.** Tiedonkulku vaiheittaisessa monitoroinnin toteutusmuodossa (Liikennevirasto 2016b).

Kuva 17 on esitetty **keskitetyn monitoroinnin** pelkistetty prosessikaavio (yksityiskohtaisempi esitys prosessista löytyy liitteestä B). Keskitetyssä monitoroinnissa monitorointiprojektin osapuolia ovat tilaaja ja pääsuunnittelija. Se on tilaajan kannalta helpoin monitoroinnin toteutusmuoto, koska se mahdollistaa suoraviivaisen tiedonkulun. Keskitetty monitorointi tosin vaatii tilaajalta syvempää tietämystä monitoroinnista arvioitaessa ehdotettujen mittaustekniikoiden soveltuvuuksia kyseiseen monitorointikohteeseen. Vaiheittaisen monitoroinnin prosessiin verrattuna monitoroinnin pääsuunnittelija ottaa vastuun myös monitoroinnin toteutuksesta ja mittausraportoinnista. (Liikennevirasto 2016b)



**Kuva 17.** Tiedonkulku keskitetyssä monitoroinnin toteutusmuodossa (Liikennevirasto 2016b).

**Hajautetun monitoroinnin** eteneminen on esitetty Kuva 18 (yksityiskohtaisempi esitys prosessista löytyy liitteestä C). Hajautetussa monitoroinnissa jokaisen monitorointivaiheen suorittaa eri osapuoli. Tilaajan lisäksi monitorointiprojektin osapuolia ovat monitoroinnin pääsuunnittelija, monitoroinnin toteuttaja sekä monitorointitulosten analysoija. Vaiheittaiseen monitorointiin verrattuna monitoroinnin pääsuunnittelijalle ei kuulu monitorointitulosten analysointi vaan sen hoitaa erillinen osapuoli. Tilaajan kannalta hajautettu monitoroinnin toteutusmuoto on projektinjohdollisesti kaikista raskain. Lisäksi tiedonkulku voi osoittautua haastavaksi prosessin pirstaleisuutensa vuoksi. (Liikennevirasto 2016b)



**Kuva 18.** Tiedonkulku hajautetussa monitoroinnin toteutusmuodossa (Liikennevirasto 2016b).

## 4. TARKASTELTAVAT SUUREET JA NIIDEN MITTAUSMENETELMÄT

Työssä tarkastelun alla olevat suureet ovat venymä, taipuma ja halkeamaleveys. Seuraavissa alaluvuissa esitellään jokaiselle suureelle kolme mittausmenetelmää. Mittausmenetelmät ovat silloille monitorointia tilaavien tahojen eniten käyttämät anturit ja mittausmenetelmät.

### 4.1 Venymä

Rakenteeseen kohdistuneita rasituksia mitataan perinteisesti mittaamalla tietyllä matkalla rakenneosaa tapahtuvaa venymää. Venymä voi olla joko vetoa tai puristusta. Mittaus voidaan suorittaa rakenteen pinnasta tai sisältä riippuen materiaalista. Kun materiaali käyttäytyy elastisesti, on venymän  $\varepsilon$  aiheuttama normaaliännitys

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta L}{L} \cdot E, \quad (1)$$

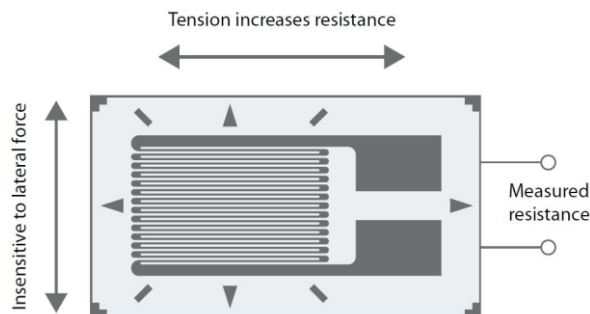
jossa  $E$  on materiaalin kimmomoduuli ja venymä  $\varepsilon$  on pituuden muutoksen  $\Delta L$  suhde alkuperäiseen pituuteen  $L$  verrattuna. Venymän ilmoittamiseen käytetään yleisesti yksikköä  $\mu S$  tai  $\mu\varepsilon$  (microstrain, mikrovenymä), joka kertoo mitattavan pituuden suhteellisen muodonmuutoksen.

Mittaamalla venymää venymäantureilla kantavan rakenteen (esim. teräspalkki) ylä- ja alaosasta, voidaan määrittää rakenteen neutraaliakselin paikka. Neutraaliakselilla tarkoitetaan palkissa kohtaa, jossa veto- ja puristusjännitykset ovat yhtä suuret. Neutraaliakseli on tällöin jännityksetön kohta palkissa.

#### 4.1.1 Vastusvenymäliuska

Vastusvenymäliuska koostuu tukipinnalle silmukkamuotoon asetetusta, tavallisesti liimaamalla kiinnitetystä metallisesta johteesta (Kuva 19). Sen toiminta perustuu sähköjohtavuuden muutokseen johteessa, kun siihen kohdistuu venymää tai puristusta. Venyessään johde ohentuu ja pitenee aiheuttaen vastuksen kasvun. Puristuessaan johde leveenee ja lyhenee vastuksen pienentyessä. Vastusarvon määrittäminen tapahtuu käyttämällä Wheatstonen silta – kytkentää. Kytkennässä käytetään hyväksi tunnettuja vastusarvoja venymäliuskan vastuksen määrittämiseen. Koska mittaus perustuu sähköjohtavuuteen, tulee mittauskaapeliin pituus ottaa myös huomioon korjauskertoimella. Pitkissä kaape-

livedoissa voi olla tarve käyttää vahvistimia signaalivoimakkuuden säilyttämiseksi. Sekä virransyöttöön että virran mittaamiseen tarvitaan omat johtimet.



**Kuva 19.** Periaatteellinen kuva vastusvenymäliuskasta (United Electronic Industries 2013).

Vastusvenymäliuskoihin perustuvan mittauksen ominaisuudet kuten tarkkuus ja mittaustaajuus riippuvat paljon mittalaitteen ominaisuuksista. Mittaustaajuus voi olla jopa 100 kHz. Mittaustarkkuus on riippuvainen mittalaitteen (elektroniikan) kyvystä lukea venymäliuskalta vastaanotettua jännitettä. Yksi mikrovoltti ( $\mu\text{V}$ ) vastaa noin yhtä mikrovenymää ( $\mu\epsilon$ ) (Lyöri 2016). Korkeammalla signaalikohinasuhteella saadaan tarkempia mittaustuloksia, joten ulkoiset häiriötekijät on syytä eliminoida. Vastusvenymäliuskat ovat herkkiä lämpötilan muutoksille, joten mittauksissa pitää käyttää lämpötilakompensointia. Pitkäaikaisessa käytössä vastusvenymäliuskan ja kaapeloinnin materiaalissa voi tapahtua muutoksia aiheuttaen mittauksiin systemaattista virhettä. (National Instruments 2012)

Liushkoja on kaupallisesti tarjolla useilla eri valmistajilla (esim. HBM, Kyowa, Omega). Saatavilla on useita eri pituuksia 5 – 100 mm väliltä. Eri materiaaleille ja kiinnityksille löytyy omanlaisensa venymäliuskamallit. Vastusvenymäliushkoja voidaan kiinnittää rakenteen pinnalle ja sisälle (esim. raudoite). Liushkojen kiinnitys tapahtuu joko liimamalla tai pistehitsaamalla huolellisesti puhdistettuun pintaan. Vaativissa olosuhteissa ja pitkäaikaisissa mittauksissa suositetaan hitsauskiinnitystä, koska liimakiinnityksessä voi tapahtua pitkäaikaismuodonmuutoksia.

#### 4.1.2 Mikrotaipuma – valokuituanturi

Mikrotaipumaan perustuva valokuituanturi mittaa muodonmuutoksia kahden pisteen välillä kumulatiivisesti. Anturin taipuma- ja venymämittaus perustuu mikrotaipumiin kuitupunoksessa, joka koostuu kahdesta tai useammasta yhteen kierretystä valokuidusta (Kuva 20). Tässä työssä on tarkasteltu ranskalaisen Osmos-yhtiön kehittämiä ja kaupallistamia valokuituantureita. Anturiin kohdistuessa mekaaninen voima kuitujen muoto muuttuu, jolloin kuituihin johdetun infrapunavalon määrä vaihtelee riippuen mitattavan rakenteen muodonmuutoksen suuruudesta. Yksittäinen anturi pystyy mittaamaan taipu-

maa ja venymää. Määritetty muodonmuutos on keskiarvo koko anturin matkalta (integraalinen anturi). (Lyöri 2007, Inaudi et al. 2001)



**Kuva 20.** Periaatekuva kuitupunoksesta (Inaudi et al. 2001).

OSMOS-valokuituantureiden mittausepävarmuus on tyypillisesti luokkaa 1  $\mu\epsilon$  (Lyöri 2007). Mittaustaajuus on säädettävissä kerran päivässä suoritettavasta mittauksesta (staattinen käyttäytyminen) aina 100 Hz:n näytteistystaajuuteen asti (dynaaminen käyttäytyminen). Anturin valoon perustuva toiminta ei ole herkkä ulkoisille sähkömagneettisille häiriötekijöille. Valokuituanturi soveltuu vuosia kestävään monitorointiin hyvän stabiiliutensa ansiosta. Anturi suojataan erillisellä koteloinnilla pitkäaikaisissa monitorinneissa.

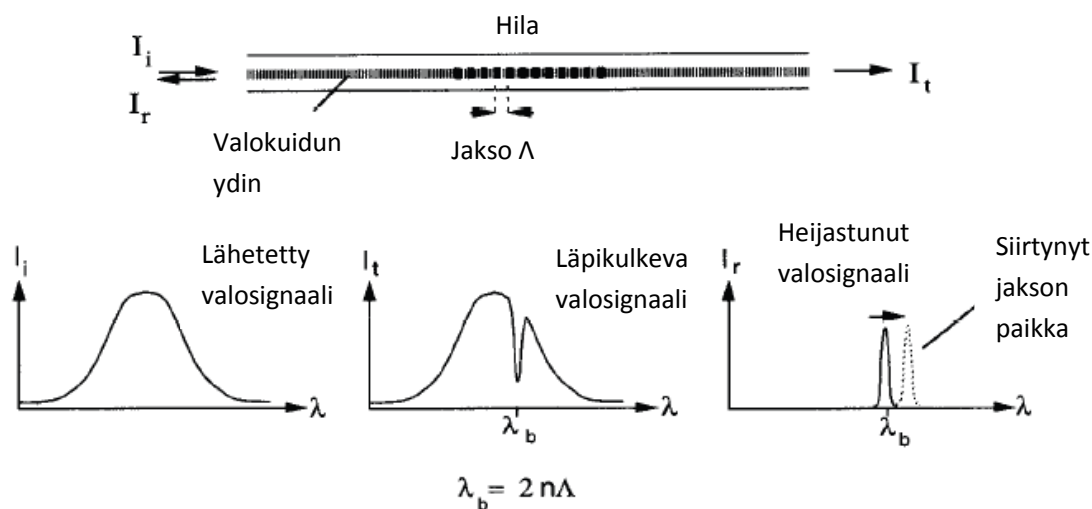
Valokuituantureita on saatavilla tarpeen mukaan eri pituuksia 1 – 10 m väliltä. Antureita voidaan kiinnittää sekä rakenteen pinnalle että sisälle (esim. raudoite). Anturi kiinnitetään ja esijännitetään messinkisten aluslevyjen avulla. Aluslevyt asennetaan kohteeseen rakenteen materiaalista riippuen joko ruuveilla, liimaamalla tai muunlaisella mekaanisella kiinnityksellä (Kuva 21). Mittalaitteelle kuidulla kytkeytyvä V5-valokuituanturi vaatii jokaiselle anturille oman tiedonsiirtokuidun. Anturista on tarjolla myös langaton versio (V2), joka ei tarvitse erillistä mittalaitetta mittaushetkellä. Langaton versio soveltuu vain pinta-asennukseen. Molempien versioiden mittaustietoja voidaan tarkastella etäluettavana.



**Kuva 21.** Vasemmalla OSMOS-valokuituantureiden asennuksessa käytettävä aluslevy. Oikealla anturipää asennettuna aluslevyyn.

### 4.1.3 FBG – valokuituanturi

Yksimuotokuidusta koostuva FBG – valokuituanturi (Fiber Bragg Grating, Kuva 22) perustuu Braggin hilaan. Valokuidun ytimeen on tehty taitekertoimen ( $n$ ) muutoksella jaksollisia hilarakenteita, jotka heijastavat lähetetystä valosta takaisin vain tiettyä kyseiselle hilalle ominaista aallonpituutta ( $\lambda_b$ ). Jännitettäessä kuitua hilan jakson ( $\Lambda$ ) paikka siirtyy, joka muuttaa myös takaisin heijastuvan valosignaalin aallonpituutta. Venymän suuruus saadaan määritettyä tarkkailemalla aallonpituuden muutosta. FBG – valokuituanturi on lämpötilariippuvainen, joten lämpötilan muutokset tulee kompensoida joko referenssikuidulla tai ulkoisella lämpötila-anturilla. (Lyöri 2007)



**Kuva 22.** FBG – valokuituanturin toimintaperiaate (perustuu lähteeseen Lyöri 2007).

FBG-tekniikkaan perustuvia valokuituantureita on kaupallisesti tarjolla useilla valmistajilla (mm. Micron Optics, Smartec, HBM). Antureita on saatavilla sekä venymäliuskan kaltaisina pistevenymäantureina että integroivina antureina (pitkä valokuituanturi). Tässä työssä on lähinnä tutkittu Micron Opticsin anturitarjontaa. FBG-valokuituantureiden mittauserävarmuus on yleensä pienempi kuin  $0,3 \mu\epsilon$ . (Lyöri 2007) Mittaustaajuus on 1 Hz – 2 kHz riippuen mittalaitteen ominaisuuksista. FBG-valokuituanturit eivät myöskään ole herkkiä ulkoisille sähkömagneettisille häiriötekijöille ja ne soveltuvat vuosia kestävään monitorointiin hyvän stabiiliutensa ansiosta.

Micron Opticsin FBG-valokuituantureita on saatavilla 22 mm pistevenymäantureista (Kuva 23) aina 1500 mm integroiviin antureihin (Kuva 24). Antureita voidaan kiinnittää sekä rakenteen pinnalle että sisälle (esim. raudoite). Pistevenymäanturit asennetaan joko hitsaamalla tai liimaamalla. Integroivat anturit on valmiiksi suojattu putkimaiseen rakenteeseen (putkivenymäanturi) ja niiden asennukseen on tarjolla useita vaihtoehtoja kiinnityspinnan materiaalista riippuen (Kuva 25). Putkivenymäanturien asentamisessa



on käytetty myös supermagneetteja kiinnitysholkkien kiinnittämiseksi teräspalkkiin. FBG-tekniikka mahdollistaa antureiden sarjakytkennän, joten käytettäessä useampaa FBG-valokuituanturia mittalaitteelle ei tarvitse liittää kuin yksi tiedonsiirtokuitu.



**Kuva 23.** FBG-pistevenymäanturit pistehitsaus- ja liimausasennukseen (Micron Optics 2016).



**Kuva 24.** Putkivenymäanturit asennettavissa rakenteen sisälle (vas.) ja pinnalle (oik.) (Micron Optics 2016).



**Kuva 25.** Putkivenymäanturien kiinnitysholkkeja (ruuvaus, betonivalu, hitsaus, kemiallinen ankkurointi) (Micron Optics 2016).

## 4.2 Taipuma

Taipuma syntyy, kun mitattavaan rakenteeseen kohdistuu pituussuuntaan kohtisuora voima, josta aiheutuu poikkeamaa. Taipuma on erinomainen parametri kertomaan sillan rakenteen toiminnasta ja materiaalin kunnosta. Taipumaa mitataan yleensä, kun selvitetään sillan kantavuutta koekuormittamalla. Mittauskohdaksi valitaan yleensä kentän keskikohta, jossa suurimmat liikkeet tapahtuvat.

Taipuman suuruusluokka vaihtelee paljon siltatyypin mukaan. Riippusilloilla taipuma voi olla kymmeniä senttimetrejä, kun se lyhyillä betonisilloilla voi olla alle millimetri. Mittausmenetelmä on valittava täten suurimman taipuman mukaan. Eri siltatyypin sallitut taipumat on esitetty luvussa 2.7.

### 4.2.1 Takymetri

Takymetrin toiminta perustuu mittapisteen sijainnin määrittämiseen trigonometrialla käyttäen hyväksi takymetrin sensoripään kulmia ja etäisyystietoa. Sillan taipuma saadaan vertailemalla kahden mittapisteen poikkeamaa ennen ja jälkeen kuormituksen.

Takymetri sijoitetaan yleensä sillan ulkopuolelle mittausten suorittamiseksi. Perinteiset takymetrit sopivat parhaiten koekuormitustilanteisiin niiden hitaan toiminnan vuoksi. Yksittäinen mittaus voi kestää useita sekunteja. Mittauksissa voidaan käyttää apuna prismoja parempien mittaustulosten saavuttamiseksi. Prismoja hyödynnetään myös käytettäessä robottitakymetriä, joka suorittaa mittaukset automaattisesti useaan prismaan. Mittauksiin voi aiheutua virhettä valosignaalin taipumasta ilman rajakerroksesta (esim. sillan päällysteen kuumeneminen). Lisäksi huono näkyvyys, sade ja sumu voivat tehdä mittaukset haastaviksi. (Liikennevirasto 2016a) Takymetrin kulmamittauksen tarkkuus vaihtelee malleista riippuen 0,3 – 1,5 mgon välillä. Etäisyydet mitataan 1 – 3 mm tarkkuudella riippuen mittausnopeudesta. Kuva 26 on esimerkki Leican valmistamasta takymetristä. (Leica Geosystems 2016)



*Kuva 26. Takymetri Leica TPS1200+ (Leica Geosystems 2016).*

#### 4.2.2 DMM – tasomittauslaite

Dimense Oy:n kehittämä DMM-tasomittauslaite (Deflection Multi Meter) koostuu DMM-yksiköstä (vastaanotin) ja tasolaserista (lähetin) (Kuva 27). Mittalaite monitoroi taipumaa reaaliaikaisesti yhdessä tai useammassa pisteessä riippuen käytettävien DMM-yksiköiden määrästä. DMM-yksikkö mittaa pystysuuntaista poikkeamaa suhteessa laserin muodostamaan referenssitason. Mittalaitteen toiminta perustuu DMM-yksikön ikkunan takana oleviin valodiodirivistöihin, jotka havaitsevat pyörivän tasolaserin valosignaalin. Poikkeama-arvo riippuu lopulta siitä, mihin kohti DMM-yksikön ikkunaa valosignaali kohdistuu. Kertamittauksella mittalaite pystyy mittaamaan 0,5 mm poikkeamat. Keskiarvostamalla peräkkäisiä mittauksia saadaan mittaustuloksia parannettua. Tasolaserin pyörintänopeus (600 rpm) asettaa mittaustaajuudeksi 10 Hz. DMM-tasomittauslaitteen mittausepävarmuus johtuu samoista valon etenemiseen liittyvistä tekijöistä kuin takymetrinkin. (Dimense Oy 2016)



**Kuva 27.** DMM-yksikkö ja tasolaser Leica Rugby 830 (Dimense Oy 2016).

Mittauslaitteen asennuksessa DMM-yksikkö kiinnitetään mitattavaan rakenteeseen. Tasolaser sijoitetaan sellaiseen paikkaan, missä sillan kuormitukset eivät vaikuta sen tasoon. Tällaisia paikkoja voi olla esimerkiksi sillan välituki tai penkere. DMM-yksikön asennuksessa käytetään erillistä telineettä, joka kiinnitetään rakenteeseen mekaanisesti materiaalista riippuen. Kuva 28 on esitetty eräs DMM-yksikön asennus. Teline on kiinnitetty puristimilla teräspalkin alalaippaan vahingoittamatta siltaa. DMM-yksikkö kiinnittyy telineeseen supermagneeteilla, joten sen pystysuuntaista asemointia on helppo muuttaa. (Lyöri 2016)

DMM-tasomittauslaitteen mittaustietojen luku tapahtuu pääasiassa erillisellä tietokoneella, joka voi lähettää mittaustiedot edelleen pilvipalveluun. Optiona on akkukäyttöinen DMM-yksikkö, jonka mittaustiedot voidaan lukea langattomasti paikan päällä. DMM-yksikkö voidaan myös varustaa 3G-modeemilla, joka mahdollistaa tasomittauslaitteen itsenäisen toiminnan ilman erillistä tietokonetta. Jokainen DMM-yksikkö sisältää myös kaksisuuntaisen kallistus- ja kiihtyvyysanturin. Lisäksi siihen on liitettävissä kolme ulkopuolista jännite- tai virtalähtöistä anturia (esim. venymäliuska, siirtymäanturi, termoelementti) (Dimense Oy 2016). DMM-tasomittauslaite soveltuu erinomaisesti lyhytaikaiseen monitorointiin. Vuosia kestävästä DMM-tasomittauslaitteella suoritettua monitoroinnista ei laitetoimittajalla ole vielä kokemuksia. (Lyöri 2016)



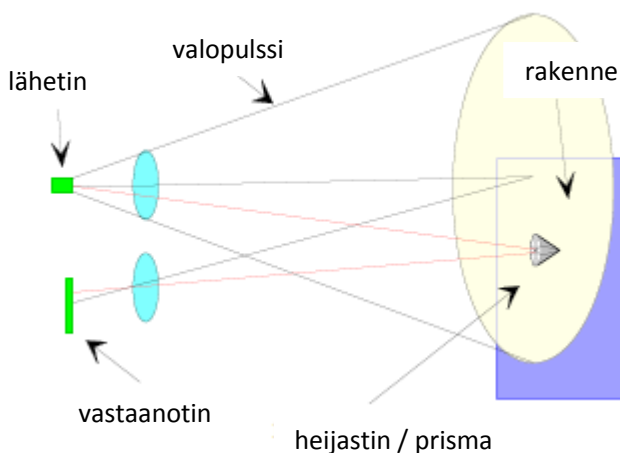
**Kuva 28.** DMM-yksikkö kiinnitettynä teräspalkin alalaippaan (Lyöri 2016).

### 4.2.3 PSM-R M2 – siirtymämittauslaite

Noptel Oy:n PSM-R M2 – siirtymämittauslaite sisältää sekä lähettimen että vastaanotin samassa paketissa (Kuva 29). Mittauslaitteen toiminta perustuu lähetetyn ja vastaanotetun valosignaalin kulkuajan mittaamiseen ja paikantamiseen sensorikennolla (Kuva 30). Laitteen asennuksen jälkeen sensorikennolle määritetään mitattavaan rakenteeseen kiinnitetyn heijastinpinnan tai prisman referenssitaso. Prisman liikkuessa rakenteen mukana se aiheuttaa vastaanotetun valosignaalin sijaintiin muutoksen sensorikennolla. Sensorikennolla tapahtunutta poikkeamaa ja etäisyystietoa hyväksi käyttäen saadaan määritettyä rakenteessa tapahtunut siirtymä. Siirtymämittauslaite on herkkä samoille ympäristöstä aiheutuville mittausvirheille kuin DMM – tasomittauslaite.



**Kuva 29.** Rakenteeseen kiinnitettävä prisma-ryhmä ja yksittäinen prisma sekä PSM-R M2 – siirtymämittauslaite (Noptel Oy 2016).



**Kuva 30.** PSM-R M2 – siirtymämittauslaitteen toimintaperiaate (perustuu lähteeseen Noptel 2016).

Siirtymämittauslaitteen mittaustaajuus on 20 – 100 Hz riippuen halutusta erottelukyvystä. Erottelukykyyn vaikuttaa myös mittausetäisyys, joka voi maksimissaan olla 250 m mitattaessa prisma-ryhmään. Erottelukyky on tällöin 0,1 – 1,5 mm.

Siirtymämittauslaitteen asennuksessa voidaan käyttää samaa periaatetta kuin takymetrin asennuksessa. Mittauslaite vaatii mittaamiseen erillisen tietokoneen. Mittauslaite sopii parhaiten lyhytaikaiseen monitorointiin.

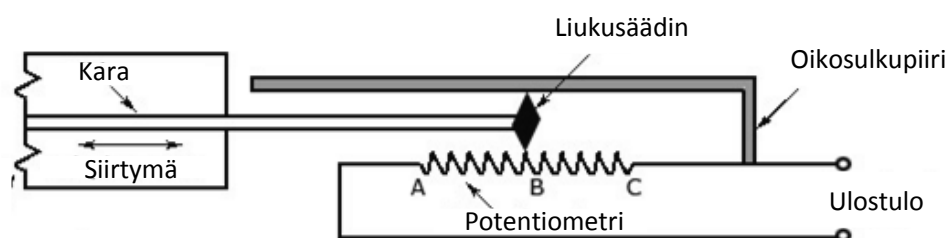
### 4.3 Halkeamaleveys

Teräsrakenteeseen kohdistuessa toistuvaa kuormitusta ja sen lopulta ylittäessä tietyn raja-arvon, rakenteen materiaali väsyä aiheuttaen halkeilua. Teräsbetonirakenteissa halkeilua ilmenee, kun rakenteen vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden. Halkeamaleveyden mittaamisella tarkoitetaan jo syntyneiden halkeamien leveyksien muutosten tarkastelua. Halkeamaleveyksiä mitataan pääasiallisesti vain teräsbetonisilloista. Sallitut halkeamaleveydet on esitetty luvussa 2.7. Alla esitetyt halkeamaleveyden mittausmenetelmät soveltuvat myös sillan eri osien välisten liikkeiden siirtymämittauksiin.

#### 4.3.1 Siirtymäanturi

Perinteiset siirtymäanturit perustuvat vastuksen (esim. lineaaripotentiometri), induktanssin (esim. LVDT, Linear Variable Differential Transformer) tai kapasitanssin mittaamiseen. Anturin osat kiinnitetään halkeaman vastakkaisille puolille, jolloin anturista lähtevän mittapään (kara) liike aiheuttaa mitattavassa suureessa (vastus, induktanssi, kapasitanssi) muutoksen.

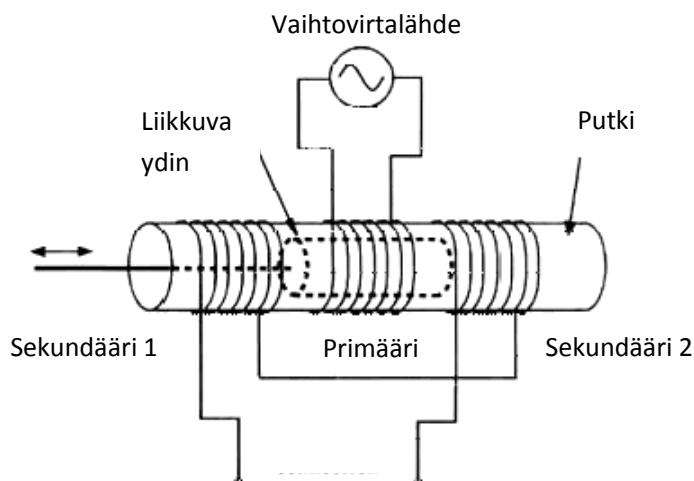
Lineaaripotentiometri koostuu potentiometristä, joka on oikosuljettu karaan liitettyllä liukusäätimellä (Kuva 31). Liukusäätimen liikkeessä potentiometrin alueella vasemmalle (kohti kirjainta A), vastus pienenee. Vastaavasti vastus kasvaa liukusäätimen liikkeessä oikealle (kohti kirjainta C). Vastuksen muutos saadaan määritettyä käyttämällä Wheatstonen siltaa. Toinen tapa määrittää vastus on kytkeä vakio virta sarjaan potentiometrin kanssa ja mitata jännite. (Instrumentation Today 2011)



**Kuva 31.** Lineaaripotentiometrin kokoonpano (Instrumentation Today 2011).

LVDT koostuu vastaavasti keloista ja ytimestä (Kuva 32). Kelat sijaitsevat ytimen putken ympärillä, joista keskimäinen on primäärinen ja kaksi muuta sekundäärisiä. Sylinterinmuotoinen ydin on kiinnitetty karaan, joka liikkuu putkessa. Primäärikelassa kulkee vaihtovirta, joka indusoituu jännitteinä sekundäärikeloihin sylinteriytimen si-

jainnin mukaan. Siirtymä määräytyy sekundäärikelojen kesken jakautuneen jännitteen suhteen perusteella. (National Instruments 2016)



**Kuva 32.** Yleinen LVDT-anturin kokoonpano (National Instruments 2016).

Siirtymäanturien tarkkuuteen vaikuttavat muun muassa lämpötila ja kosteus. Antureiden tarkkuus on useimmiten parempi kuin 0,5 – 1 % maksimimittausalueesta, joka voi olla satoja millimetrejä. (Liikennevirasto 2016a)

#### 4.3.2 Optinen ekstensiometri

Optinen valokuituekstensiometri soveltuu sekä halkeamaleveyden että siirtymien mittaamiseen. Valokuituekstensiometri toimii samalla periaatteella kuin valokuituvenymäanturi. Ekstensiometrin mittaava osa kiinnitetään halkeaman toiselle puolelle ja siitä lähtevä kara toiselle puolelle (Kuva 33). Käytännössä anturi mittaa kiinnityskohtien välistä liikettä venymän avulla. Mittausominaisuuksiltaan valokuituekstensiometri on samankaltainen valokuituvenymäanturien kanssa (Luku 4.1.2). Esimerkkinä Kuva 33 olevan OSMOS-ekstensiometrin maksimimittausalue on 5 mm ja se voidaan yhdistää samaan mittausyksikköön järjestelmätoimittajan venymäanturien kanssa.

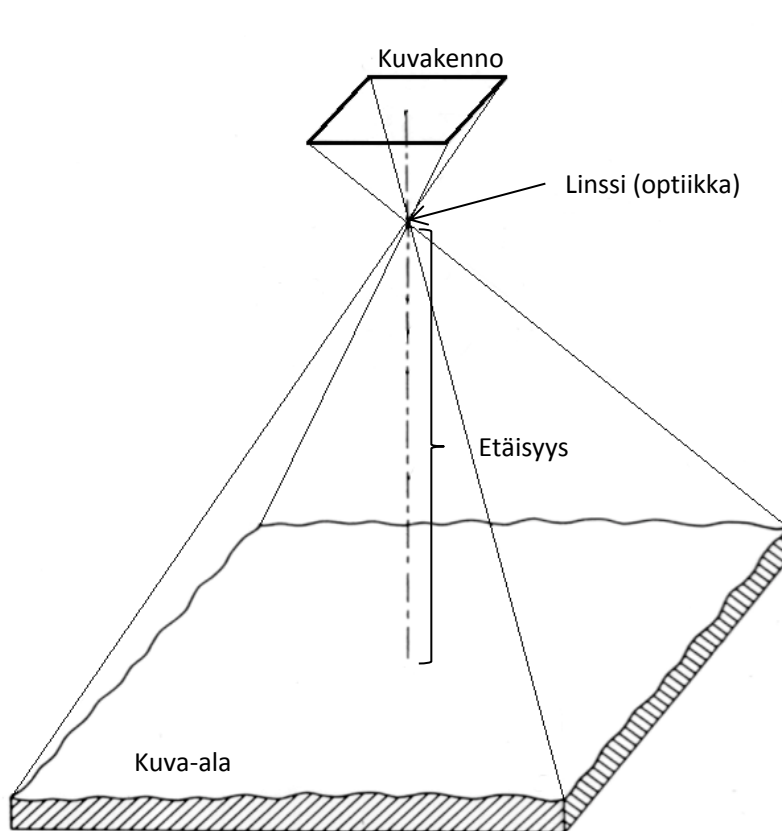


**Kuva 33.** Optinen ekstensiometri (OSMOS Canada 2016).

### 4.3.3 Fotogrammetria

Fotogrammetriaa on käytetty jonkin verran siirtymämittauksiin teollisuudessa ja se on sovellettavissa myös halkeamaleveyden mittaamiseen (Lyöri 2016). Fotogrammetria perustuu kahden pisteen etäisyyden mittaamiseen valokuvasta, kun kuva-ala mitattavalla pinnalla tiedetään (Kuva 34). Kahden pisteen välinen etäisyyden muutos saadaan vertaamalla kuvia, jotka on otettu ennen ja jälkeen muutoksen. Mittaus tapahtuu korkearesoluutioisella konenäkökameralla, jonka kuva-ala mitattavalla pinnalla määräytyy mittausetäisyyden ja kamerassa käytetyn objektiivin perusteella. Mittaustarkkuus riippuu pikselin koosta mitattavalla pinnalla, joka skaalautuu mittausetäisyyden ja objektiivin polttovälin mukaan. Mitä pienempi pikseli on mittauspinnalla, sitä korkeampi resoluutio mittauksilla on.

Mittaustarkkuuteen vaikuttavat kameras kuvakennon resoluutio, objektiivi ja mittausetäisyys. Esimerkiksi eräällä mittauskokoonpanolla resoluutio on  $50\text{ }\mu\text{m}$ , mittausetäisyyden ollessa  $15\text{ m}$  (Lyöri 2016). Konenäkökameroiden kuvanottotaajuus on yleisesti noin  $10\text{ Hz}$ :stä ylöspäin. Konenäöllä suoritettavat mittaukset vaativat hyvät olosuhteet. Epävarmuutta mittauksiin aiheuttavat ilman väräily ja kameras asennuspaikan vakaus. Fotogrammetriajärjestelmän kalibroinnissa käytetään yleensä kalibrointikuvaa, jonka kuvioiden (esim. pisteiden) mittasuhteet tunnetaan.



**Kuva 34.** Konenäkökameran kuva-alan määräytyminen.

## 4.4 Antureiden hintaluokat

Taulukko 4 on esitetty luvuissa 4.1 – 4.3 mainittujen antureiden hintaluokat. Hintaluokka on annettu yksittäiselle anturille ilman lukulaitetta ja lukulaitteen kanssa, jos anturi sellaisen tarvitsee. Analogisten vastusvenymäliuskojen lukulaitteeseen voi kytkeä muutamia antureita, joten anturimäärien kasvaessa yksittäisen vastusvenymäliuskan hinta ei ole enää määräävä. OSMOS V5 – anturit tulevat neljän (4) anturin paketeissa lukulaitteen (mittauskeskussyksikön) kanssa. V5 – antureiden lisääminen neljän anturin jälkeen kasvattaa kustannuksia noin yksittäisen anturihinnan verran. Optinen ekstensiometri (OSMOS) liitetään samaan lukulaitteeseen kuin V5 – anturit. Micron Optics FBG – anturien yhteen lukulaitteeseen voidaan liittää kymmeniä antureita, joten kustannukset nousevat yksittäisen anturihinnan mukaan antureita lisääessä. Takymetrille on annettu kaksi hintaluokkaa niiden laajan mallitarjonnan vuoksi.

**Taulukko 4.** Antureiden hintaluokkia.

Anturi	< 50 €	50 – 500 €	500 – 1500 €	1500 – 5000 €	> 5000 €
Vastusvenymäliuska	●		○		
OSMOS V5			●		○
OSMOS V2				●	
Micron Optics putkianturi			●		○
Micron Optics pisteanturi		●			○
Takymetri				●	●
PSM-R M2					●
DMM				●	
Siirtymäanturi (analoginen)			●	○	
Ekstensiometri (optinen)				●	○
Fotogrammetria					●

- yksittäisen anturin hinta ilman lukulaitetta
- anturin hinta lukulaitteineen



## 5. KENTTÄMITTAUSJÄRJESTELY

### 5.1 Monitoroitava silta

Keltin silta on Kymijoen ylittävä silta (Kuva 35). Se sijaitsee Keltin voimalaitoksen kohdalla valtatiellä 6 noin 5 km Kouvolan keskustasta länteen. Silta on neliaukkoinen teräsbetonikantinen ja kaksipalkkinen teräspalkkisilta. Sillan kansi on niin sanottu ”laiska-kantinen”, jota ei ole kiinnitetty teräspalkkeihin varsinaisilla liitinelimillä. Tästä johtuen se pääsee liikkumaan teräspalkkien päällä eikä ota poikkileikkauksessa merkittävästi puristusvoimaa vastaan. Sen jännemitat ovat 35 m + 60 m + 60 m + 35 m kokonaispituuden ollessa 203,6 m. Sillan hyödyllinen leveys on 12,5 m. Silta on valmistunut vuonna 1972. Sillan keskimääräinen vuorokausiliikenne (KVL) vuonna 2015 oli 12 144 ajoneuvoa, josta 12 % oli raskaita ajoneuvoja.

Sillan kunnon, toiminnan ja kantavuuden arvioimiseksi on sillalle tehty useita koekuormituksia. Viimeksi VTT on tehnyt sillalle koekuormituksen syksyllä 2008. Koekuormituksen perusteella on arvioitu sillan toimintaa ja väsymiskestävyyttä sekä kantavuutta raskaille ajoneuvoille ja erikoiskuormille. Koekuormituksen jälkeen siltaa on monitoroitu venymäliuskoilla VTT:n toimesta vuonna 2009.

Vuoden 2010 lopulla sillan välitukien laakerit tuilla 2 ja 4 on vaihdettu kumipesälaakereiksi. Sillalle on suoritettu yleistarkastus kesäkuussa 2011. Sillan teräspalkkien liitoksissa on merkkejä väsymisestä (säröjä). Sillan kantavuus ei ole halutulla tasolla ja kantavuusongelmien vuoksi erikoiskuljetuksia onkin jouduttu reitittämään uudelleen. Silta on pian käyttöikänsä lopussa ja on suunniteltu uusittavaksi tietyllä aikataululla (10 vuotta). Jatkuvalla monitoroinnilla silta voitaisiin käyttää loppuun hallitusti ja turvallisesti.



**Kuva 35.** Keltin silta Kouvolassa kuvattuna sillan pohjoispuolelta tuelta T5.

## 5.2 Monitorointi

Työn kannalta kenttämittauskohteen monitoroinnin tavoitteena oli tuottaa mittaustietoa eri antureiden vertailemiseksi samasta paikasta mitattuna. Toissijaisena tavoitteena oli saada mittaustietoa rakenteen toiminnasta kantavuuden arvioimiseksi. Lisäksi mittaustuloksia on mahdollisuus verrata VTT:n suorittamiin mittauksiin, jolloin voidaan päätellä onko sillan rakenteellinen kunto heikentynyt monitorointien välillä. Sillalle suoritettavalla koekuormituksella saadaan tämän hetkinen tieto sillan kantavuudesta, jota ei tässä työssä kuitenkaan analysoida. Sillalle suoritettiin kaksi erillistä koekuormitusta (21.4.2016 ja 21.6.2016).

Monitorointiprojektin suoritustavaksi valittiin Siltojen monitorointiohjeen (Liikennevirasto 2016b) mukainen **keskitetty monitorointi**. Monitoroinnin luonteen ja lyhytkestoisuuden vuoksi monitorointimenetelmäksi valittiin **kertamonitorointi**. Monitoroinnin laajuutena käytettiin **suppeaa monitorointia**. Kertamonitoroinnin tulosten perusteella jätettiin optio monitorointimenetelmän muuttamiseksi jatkuvaksi monitoroinniksi. Tämä huomioitiin jo antureita valittaessa.

## 5.3 Anturit ja mittalaitteet

Monitorointi suoritettiin kahden palvelutoimittajan (Inspecta Oy ja Dimense Oy) tarjoamilla antureilla. Venymämittauksiin käytettiin mikrotaipuma- ja FBG – tekniikkaan perustuvia optisia kuituantureita. Siirtymämittaukseen käytettiin lineaaripotentiometriä ja taipumamittauksiin DMM – tasomittauslaitetta. Tiedonsiirtokuidulla varustetut mikrotaipuma-anturit luettiin OSMOS – monitorointikeskuksella. FBG – antureiden lukemiseen käytettiin Micron Opticsin SM125-500 lukulaitetta. Mittalaitteiden ja antureiden tarkat tekniset tiedot löytyvät liitteestä K (monitorointisuunnitelma). Taulukko 5 on esitetty monitoroinnissa käytetyt anturit ja niihin liittyvät tärkeimmät ominaisuudet.

*Taulukko 5. Monitoroinnissa käytetyt anturit ja niiden ominaisuuksia.*

Anturimalli	Pituus [mm]	Mittausalue	Tarkkuus	Mittaustaajuus [Hz]	Mitattava suure
OSMOS V5	2000 / 1000	± 2 mm	± 2 µm	100	Venymä
OSMOS V2	2000	± 1000 µε ± 2 mm	20 µm	50	Venymä
Micron Optics os3610	254	± 2500 µε ± 0,635 mm	< 2 µε	2	Venymä
Micron Optics os3110	22	± 2500 µε ± 0,055 mm	< 2 µε	2	Venymä
Micron Optics os3120	22	± 2500 µε	< 2 µε	2	Venymä
LIPS P103		± 125 mm	10 µm	10	Siirtymä
DMM		160 mm	0,5 mm	10	Taipuma

### 5.3.1 Antureiden sijainnit

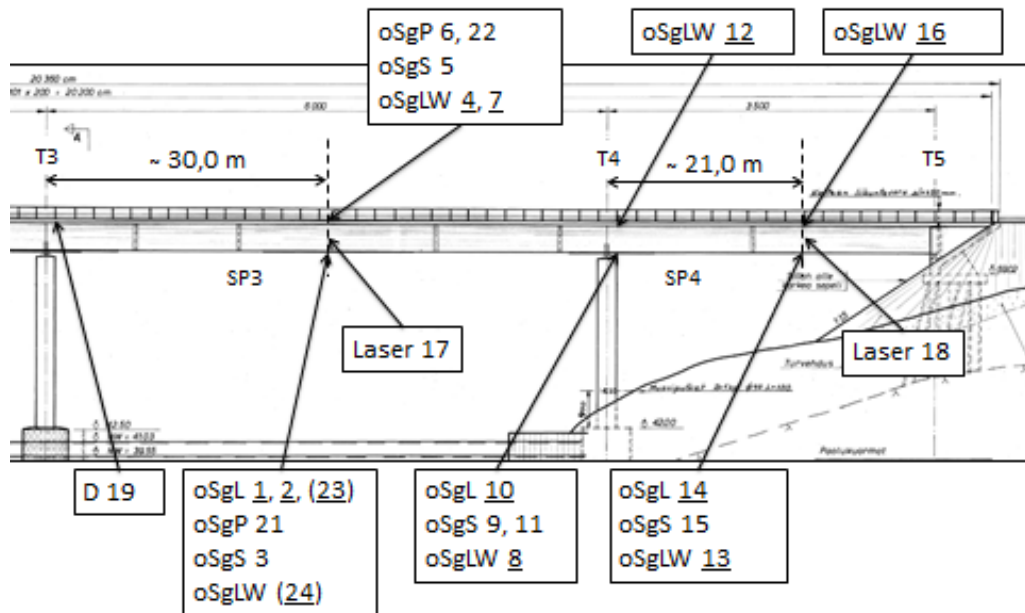
Antureita asennettiin ennen ensimmäistä koekuormitusta (21.4.2016) yhteensä 21 kappaletta. Anturit nimettiin niiden ominaisuuksien perusteella. Lisäksi antureiden nimien perään lisättiin juokseva numero. Taulukko 6 on listattu käytettyjen antureiden nimeäminen, asennustapa ja lukumäärät. Tummennetulla taustalla olevat anturit poistettiin koekuormitusta seuraavana päivänä. Jälkiasennuksena lisättiin kaksi anturia, joiden lukumäärät on esitetty taulukossa sulkeissa. Toisessa koekuormituksessa (21.6.2016) antureita oli 12 kappaletta.

**Taulukko 6.** Antureiden nimeäminen, asennustapa ja lukumäärät.

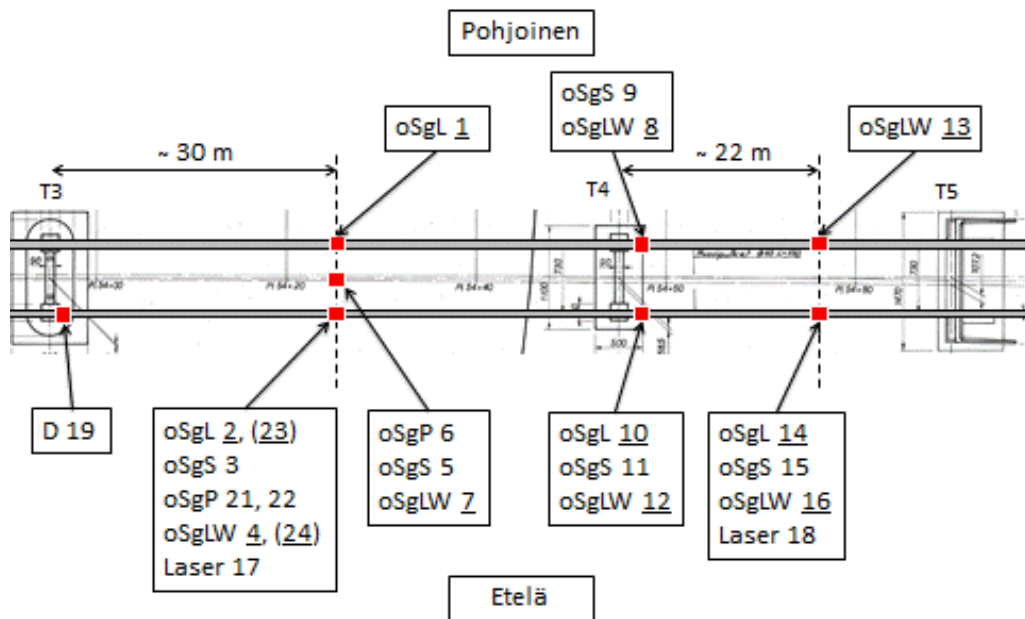
Anturimalli	Anturin nimi	Selitys	Asennustapa	Lukumäärä (jälkiasennus)
OSMOS V5	oSgL	optical Strain gauge Long (pitkä kuituanturi)	Liimaus	4 + (1)
OSMOS V2 (LIRIS)	oSgLW	optical Strain gauge Long Wireless (langaton pitkä kuituanturi)	Liimaus/ Mekaaninen	6 + (1)
Micron Optics os3610	oSgP	optical Strain gauge Pipe (pitkä kuituanturi putkessa)	Magneetti/ Mekaaninen	3
Micron Optics os3110	oSgS	optical Strain gauge Short (pistekuituanturi)	Pistehitsaus	4
Micron Optics os3120	oSgS	optical Strain gauge Short (pistekuituanturi)	Liimaus	1
LIPS P103	D	Displacement (siirtymäanturi)	Magneetti	1
DMM	Laser	taipuma-anturi (DMM)	Magneetti	2
			<b>Yhteensä</b>	<b>21 + (2)</b>

Mittauskohdiksi rakenteesta valikoitiin samoja kohtia, joita VTT on käyttänyt omassa monitoroinnissaan. Venymäantureiden ja taipumamittalaitteiden päämittauskohdat olivat keskiaukon (SP3), välituen (T4) ja reuna-aukon (SP4) teräspalkeissa (sekä ylä- että alalaipat), joissa taivutusmomentti on suurimmillaan (Kuva 36 ja Kuva 37). Lisäksi mitattiin betonikannen ja teräspalkin välistä liikettä sekä betonikannen poikkiraidoituksen ja -pinnan venymää. Osa mittauskohdista varustettiin kaksoisanturoinnilla vertailevan

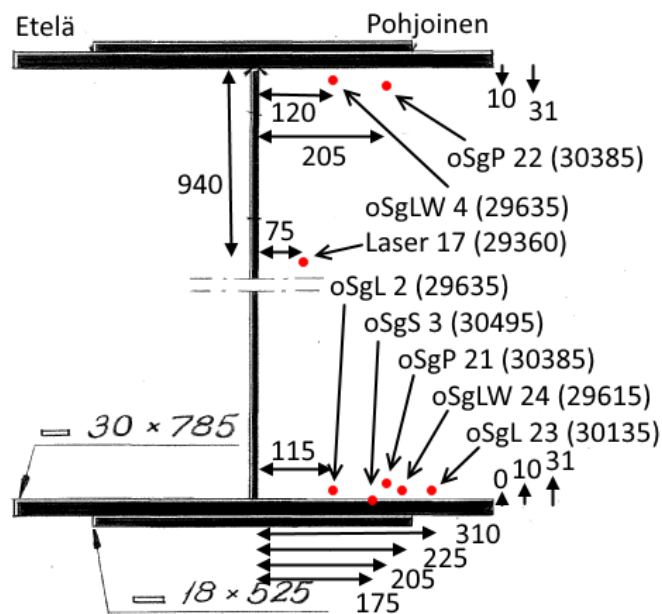
mittaustiedon tuottamiseksi. Anturit numeroilla 23 ja 24 asennettiin jälkiasennuksena ensimmäisen koekuormituksen jälkeen. Toisen koekuormituksen ajaksi jätettiin kiinni kaikki oSgL ja oSgLW nimellä olevat anturit (numerointi alleviivattu anturointikuvissa). Antureiden tarkat sijainnit on määritelty liitteenä (K) olevassa Keltin sillan monitorointi- ja toteutussuunnitelmassa monitorointikäsi­kirjan ohjeistuksen mukaan. Suunnitelmassa esiintyvää siirtymäanturia D20 ei asennettu teknisten ongelmien vuoksi. Mittalaitteet sijoitettiin sillan keskiaukon keskivaiheille rakennetulle telineelle. Antureiden sijainnit sillan poikkileikkauksessa on esitetty kuvissa 38 – 44. Kuvissa esiintyvät mitat ovat millimetrejä. Anturinimen perässä sulkeissa oleva mitta kertoo sillan kasvusuunnassa anturin ensimmäisen kiinnityspisteen etäisyyden sillan edelliseen tukeen. Esimerkiksi keskiaukossa 3 (SP3) sijaitsevan anturin etäisyys mitataan tukeen T3.



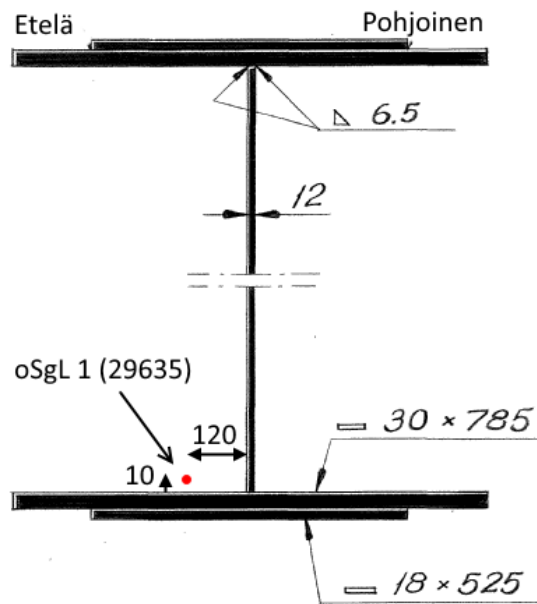
**Kuva 36.** Anturointi sillan sivuleikkauksessa välillä T3-T5.



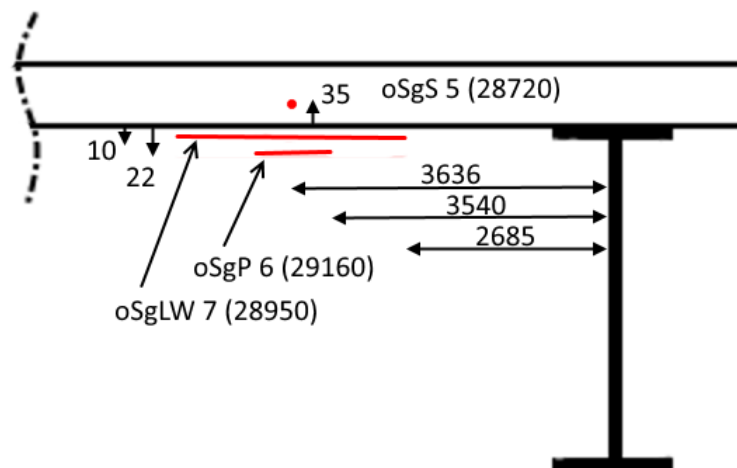
**Kuva 37.** Anturointi sillan tasokuvassa välillä T3-T5.



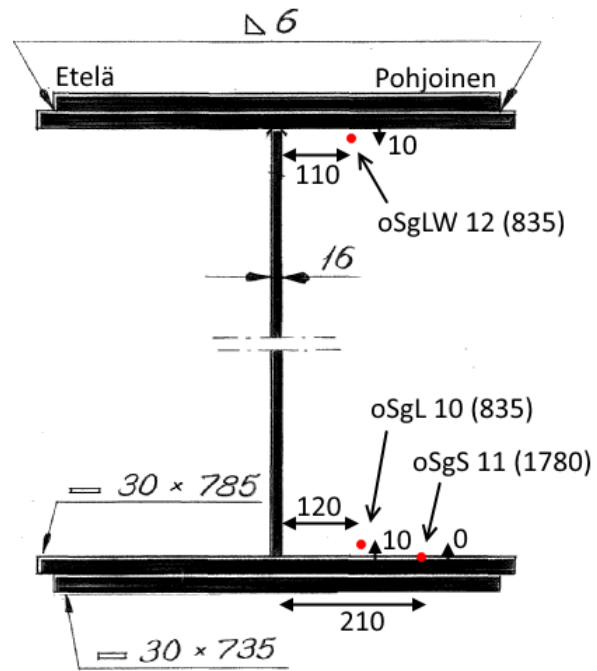
**Kuva 38.** Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan eteläisessä teräspalkissa keskiaukossa SP3.



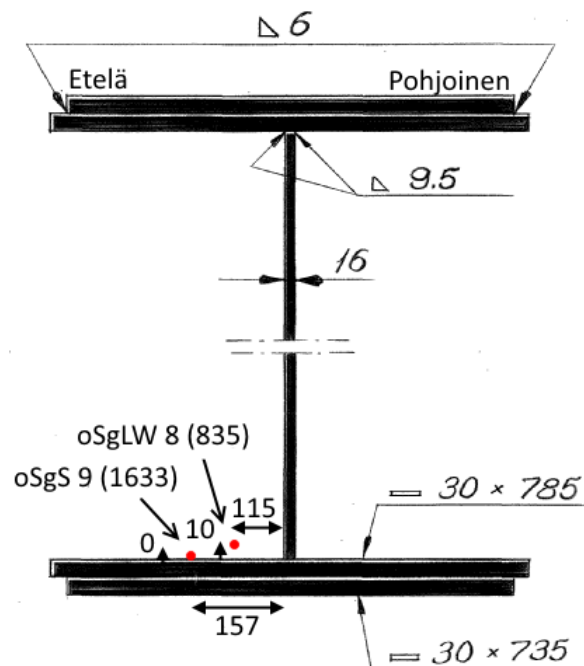
**Kuva 39.** Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan pohjoisessa teräspalkissa keskiaukossa SP3.



**Kuva 40.** Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan kannessa keskiaukossa SP3. Ku-  
vassa pohjoinen pääkannattaja.



**Kuva 41.** Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan eteläisessä teräspalkissa tuella T4.



**Kuva 42.** Poikkileikkauskuva anturoinnista sillan pohjoisessa teräspalkissa tuella T4.





### 5.3.2 Antureiden asennus

#### Taipuma-anturit

Taipumamittauksissa käytettiin DMM-tasomittauslaitteita. DMM-yksiköt asennettiin sillan pääkannattajan (teräspalkki) uuman keskivaiheille kahdella supermagneetilla (Kuva 45a). DMM-yksiköille asennettiin sillan välituella T4 tehdylle telineelle referenssitasolaser (Spectra Precision LL300s, Kuva 45b). Laserin etäisyys DMM-yksiköistä oli 20 – 30 metriä.



**Kuva 45.** a) DMM-yksikkö kiinni uumassa ja b) tasolaser välituella T4.

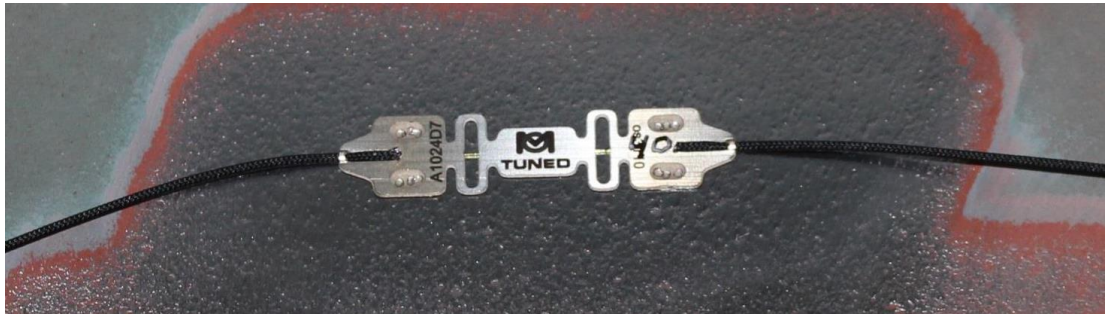
#### Venymäanturit

Venymämittauksissa käytettiin kahden eri valmistajan valokuituantureita:

- Micron Optics pistevenymäanturi (os3100/os3120)
- Micron Optics putkianturi (os3610)
- OSMOS V5 (tiedonsiirtokuidullinen)
- OSMOS V2 (langaton).

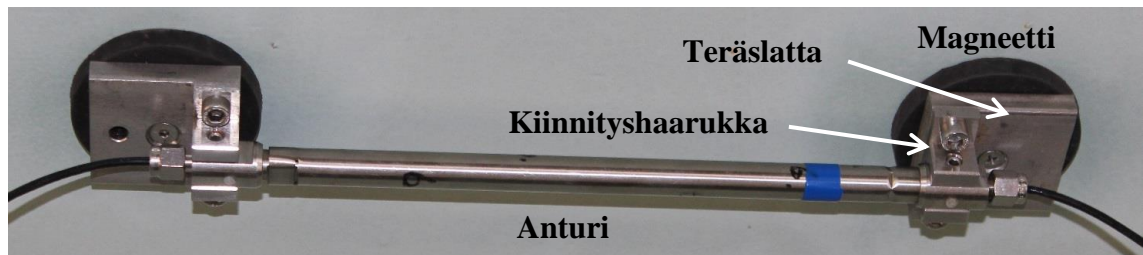
Pistevenymäanturit os3100 pistehitsattiin teräspalkin laippaan, josta maalipintaa poistettiin ensin koneellisesti (Kuva 46). Hitsaukset suoritettiin anturivalmistajan ohjeistuksen mukaisesti käyttäen Vishay:n valmistamaa Model 700 - pistehitsauslaitetta (40 joulen hitsausenergia per pulssi). Hitsauksessa pistevenymäanturit kiinnitettiin kuudella pistehitsauksella molemmista päistä. Pistevenymäanturi os3120 liimattiin harjateräkseen, joka oli vesipiikattu esille betonikannen alapinnasta (Kuva 48). Harjateräs tasoitettiin kulmahiomakoneella noin 8 cm matkalta. Liimauksessa käytettiin Loctite EA9492

epoksiliimaa. Liimauspuristimina käytettiin magneetteja. Kaikki kiinnitysalueet puhdistettiin huolellisesti alkoholipohjaisella puhdistusnesteellä ennen kiinnitystoimenpidettä.

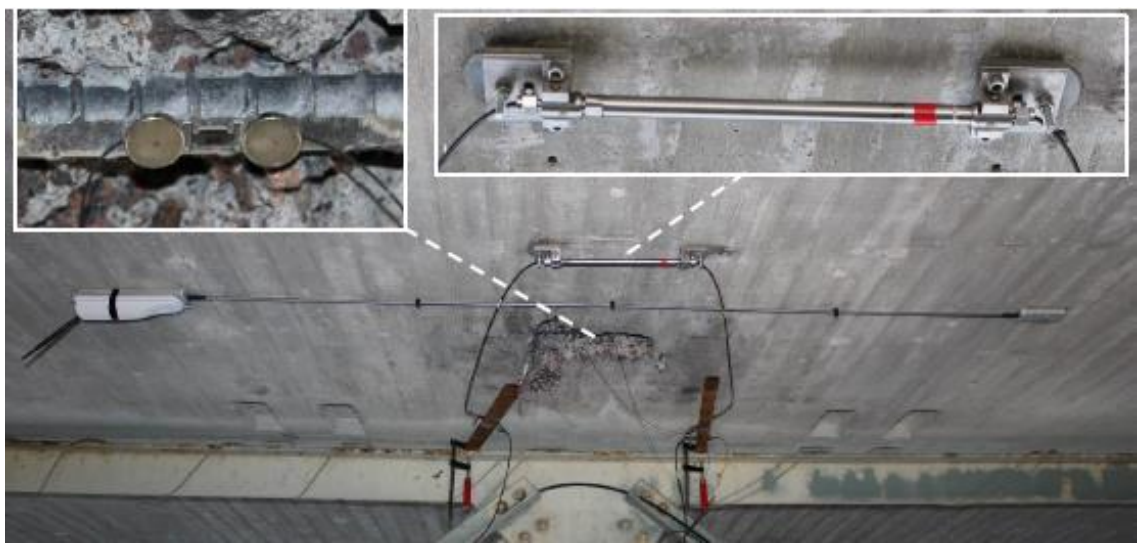


**Kuva 46.** Teräspalkkiin hitsattu pistevenymäanturi os3100.

Putkianturit os3610 asennettiin teräspalkkeihin ja betonikanteen. Asennuksessa käytettiin Micron Optics:in valmistamia kiinnityshaarukoita, joihin oli kiinnitetty teräslatat helpottamaan anturin suuntausta. Asennukset tehtiin teräspalkkeihin magneeteilla, joihin teräslatat kiinnitettiin M5-kokoisella pultilla (Kuva 47). Teräslatan ja betonikannen välisessä kiinnityksessä käytettiin 6 mm:n kierretankoa ja kemiallista betonia (Kuva 48).

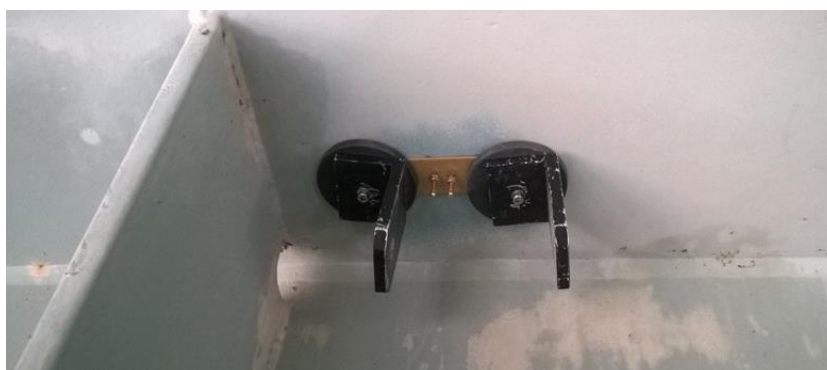


**Kuva 47.** Magneeteilla asennettu putkianturi os3610.



**Kuva 48.** Antureita asennettuna betonikannen pintaan ja poikkiraidoitukseen.

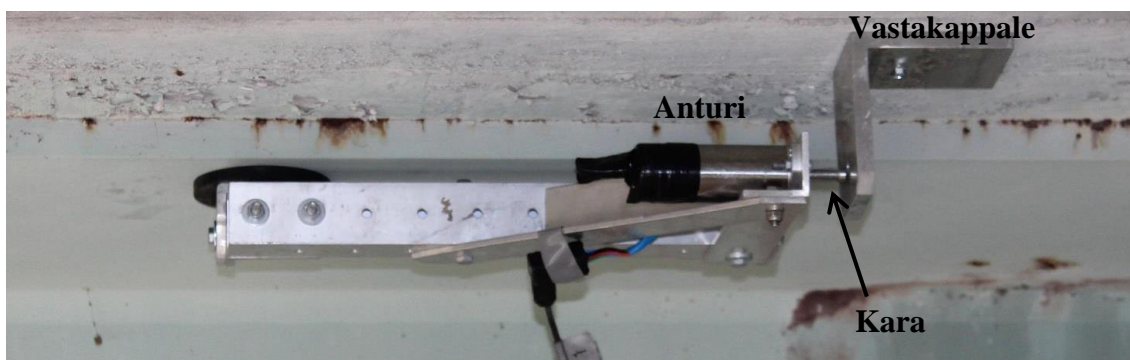
OSMOS-anturien aluslevyt liimattiin teräspalkin laippoihin maalipinnan poiston ja puhdistuksen jälkeen. Liimauksessa käytettiin Scantech Match M 2-komponentti-liimaa. Aluslevyjen liimauksessa ylälaipan alapintaan käytettiin apuna supermagneetteja (Kuva 49). Liimauksen kuivuttua OSMOS-antureiden kahden metrin mittava kuituosajännitettiin kalibrointikireyteen aluslevyjen välille. Anturi kiinnitettiin aluslevyjen pultteihin muttereilla. Lisäksi mittavaalle kuituosalle liimattiin laippaan kiinnikkeitä. Betonipintaan asennettaessa anturien aluslevyjen kiinnityksille porattiin reiät. Reikiin upotettiin proppu, johon aluslevyt ruuvattiin kiinni. Kiinnikkeet mittavaalle kuituosalle asennettiin samalla kiinnitysmekanismin avulla kuin aluslevytkin. Kuva 48 näkyy V2-anturi asennettuna betonikannen alapintaan.



*Kuva 49. OSMOS-anturien aluslevyjen liimauksessa ylälaippaan apuna magneetit.*

### **Siirtymäanturi**

Betonikannen ja teräspalkin siirtymää toisiinsa nähden mitattiin lineaarianturilla (Kuva 50). Anturina käytettiin Positek:in tuotetta P103.25. Siirtymäanturi luettiin käyttäen DMM-tasomittauslaitteen sisäänrakennettua ominaisuutta, joka mahdollistaa kolmen ulkopuolisen anturin mittaamisen kullakin DMM-yksiköllä. Siirtymäanturi kiinnitettiin teräspalkin ylälaipan alapintaan magneeteilla siten, että mittaalue oli noin puolivälissä jousitetun karan ollessa vastakappalea vasten. Vastakappale kiinnitettiin betonikanteen 60/6 mm betoniruuville.



*Kuva 50. Siirtymäanturi asennettuna.*

## 5.4 Koekuormitukset ja niiden tulokset

Sillalle suoritettiin kaksi koekuormitusta. Ensimmäisessä koekuormituksessa (A) kuormitusvaiheita oli kuusi (6) kappaletta. Toisessa koekuormituksessa (B) kuormitusvaiheita oli 15 kappaletta. Taulukko 7 ja Taulukko 8 on esitetty molempien koekuormitusten kuormitusvaiheiden tiedot yksityiskohtaisesti. Kuormitusajot suoritettiin pääosin sillan kasvusuunnassa tuelta T1 tuelle T5. Koekuormituksen aikana sillalla ei ollut muuta liikennettä. Kuormituskalustona käytettiin 8- ja 9-akselista täysperävaunuyhdistelmää. Lisäksi kolmantena ajoneuvona oli koekuormituksessa A 11-akselinen HCT-yhdistelmä (High Capacity Transport) ja koekuormituksessa B 8-akselinen lavetti. Lavetille oli järjestetty lisäpainoja, joita lisättiin kahteen otteeseen. Kuormitusajoneuvojen tiedot on esitetty liitteessä H. Ajoneuvojen akselipainoja ei punnittu erikseen koekuormitusta varten. Kokonaismassat on saatu lastauksen yhteydessä annetuista punnitustodistuksista.

Koekuormitusten mittaustuloksia käsitellään vain niiden antureiden osalta kuin se on työn kannalta oleellista. Työssä on esitetty vain ne mittaustulokset, joita on käytetty kattavan anturivertailun tekemiseksi. Koekuormitusten yleisiä mittaustuloksia on käytetty läpi seuraavissa alaluvuissa. Anturivertailua mittaustulosten pohjalta on tehty luvussa 6.

**Taulukko 7.** Koekuormitusvaiheet koekuormituksessa A (21.4.2016).

Vaihe	Ajoneuvot	Kokonaismassa	Ajolinja	Nopeus	Kuormitustapa	Ajosuunta
A1	9-aks.	77 t	Oikean kaistan reunalinja	Kävely	Pysäytykset 6 m välein	T1 - T5
A2	9-aks.	77 t	Vasemman kaistan reunalinja	Kävely	Pysäytykset 6 m välein	T1 - T5
A3	8-aks. ja 9-aks. peräkkäin	70 t + 77 t	Oikean kaistan reunalinja	Kävely	Pysäytykset 6 m välein	T1 - T5
A4	HCT	85 t	Oikean kaistan reunalinja	Kävely	Pysähtymättä	T1 - T5
A5	9-aks. ja 8-aks. vierekkäin	77 t + 70 t	9-aks. oikean ja 8-aks. vasemman kaistan reunalinja	Kävely	Pysäytykset aukkojen keskellä (SP3 ja SP4)	T1 - T5
A6	9-aks.	77 t	Oikean kaistan keskellä	Kävely	Pysähtymättä	T1 - T5

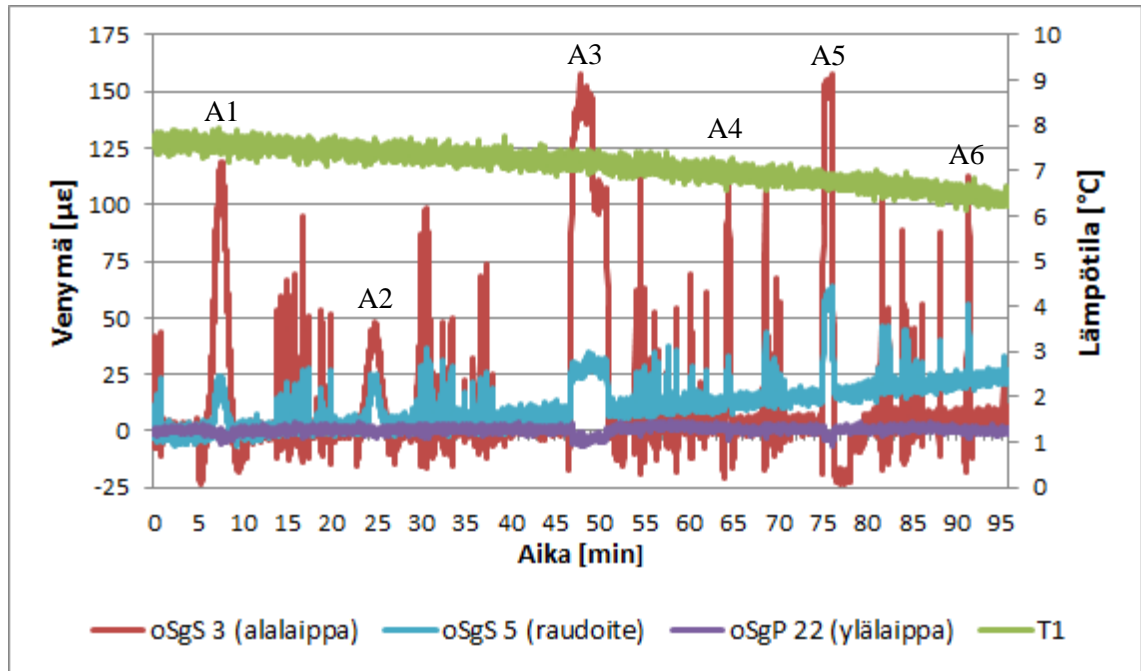
**Taulukko 8.** Koekuormitusvaiheet koekuormituksessa B (21.6.2016).

Vaihe	Ajoneuvot	Kokonaismassa	Ajolinja	Nopeus	Kuormitustapa	Ajosuunta
<b>B1</b>	9-aks.	76 t	30 cm johteesta (oik)	Kävely	Pysähtymättä	T1 - T5
<b>B2</b>	8- ja 9-aks. peräkkäin	68 t + 76 t	Oikean kaistan keskellä	Kävely	Pysähtymättä	T1 - T5
<b>B3</b>	8- ja 9-aks. vierekkäin 150 cm etäisyydellä	68 t + 76 t	9-aks. 30 cm johteesta (oik)	Kävely	Pysäytys keskiaukon (SP3) keskellä	T1 - T5
<b>B4</b>	8- ja 9-aks. vierekkäin 60 cm etäisyydellä	68 t + 76 t	9-aks. 30 cm johteesta (oik)	Kävely	Pysäytys keskiaukon (SP3) keskellä	T1 - T5
<b>B5</b>	9-aks.	76 t	Oikean kaistan keskellä	Kävely	Pysähtymättä	T1 - T5
<b>B6</b>	Lavetti	140 t	Oikean kaistan keskellä	Kävely	Pysähtymättä	T1 - T5
<b>B7</b>	Lavetti	140 t	100 cm johteesta (oik)	Kävely	Pysäytys keskiaukon (SP3) keskellä	T1 - T5
<b>B8</b>	Lavetti ja 9-aks. vierekkäin 60 cm etäisyydellä	140 t + 76 t	Lavetti 30 cm johteesta (oik)	Kävely	Pysäytys keskiaukon (SP3) keskellä	T1 - T5
<b>B9</b>	Lavetti	156 t	Oikean kaistan keskellä	Kävely	Pysäytys keskiaukon (SP3) keskellä	T1 - T5
<b>B10</b>	Lavetti	156 t	Vasemman kaistan keskellä	Kävely	Pysähtymättä	T5 - T1 peruuttamalla
<b>B11</b>	Lavetti	156 t	30 cm johteesta (oik)	Kävely	Pysäytys keskiaukon (SP3) keskellä	T1 - T5
<b>B12</b>	Lavetti	156 t	Oikean kaistan keskellä	60 km/h	Pysähtymättä	T5 - T1
<b>B13</b>	Lavetti	172 t	Oikean kaistan keskellä	Kävely	Pysäytys keskiaukon (SP3) keskellä	T1 - T5
<b>B14</b>	Lavetti	172 t	Vasemman kaistan keskellä	Kävely	Pysähtymättä	T5 - T1 peruuttamalla
<b>B15</b>	Lavetti	172t	Keskellä siltaa	Kävely	Pysäytys keskiaukon (SP3) keskellä	T1 - T5



### 5.4.1 Tulokset: koekuormitus A

Kuva 51 on havainnollistettu venymien suuruuksia koekuormituksen A aikana sillan eri rakenneosissa. Kuvassa on esitetty vain yhden anturin mittaustulokset rakenneosaa kohden kuvaajan selkeyden ylläpitämiseksi. Lämpötila (T1) kuvaa teräspalkin lämpötilamuutoksia koekuormituksen aikana. Kuormitusvaiheiden A1 – A6 väliset piikit kuvaajassa ovat normaalin liikenteen aiheuttamia muodonmuutoksia rakenteessa.



**Kuva 51.** Venymien suuruusluokka eri rakenneosissa koekuormituksen A aikana.

Anturit nollattiin ennen koekuormituksen aloittamista. Anturien lähtötasot kuitenkin muuttuivat koekuormituksen aikana. Tämä näkyy erityisesti betoniteräksen venymiä mittaavan anturin (oSgS 5) loppupään mittaustuloksissa, kun siltaa ei kuormiteta. Anturien lähtötaso muuttuu selvästi enemmän kuin muilla antureilla. Tämä johtuu kyseiselle anturille epätäydellisestä lämpötilakompensoinnista. Pistevenymäantureiden lämpötilakompensoinnissa käytetty absoluuttilämpötila-anturi oli asennettu teräspalkkiin, jonka lämpötilamuutos poikkeaa niin ajallisesti kuin lämpötilaltaan betoniraudoitteen vastavasta. Mittauksissa käytettiin teräksen lämpölaajenemiskerrointa  $CTE = 12 \text{ (}\mu\text{m/m per C)}$  kaikilla FBG-antureilla.

Lähtötasojen muutokset voivat myös johtua muun muassa sillassa olevien jännitysten laukeamisesta/syntymisestä kuormitettaessa, kuormitusvaiheiden välisistä lämpötilamuutoksista, siltarakenteen väsymisestä, paalujen painumisesta tai pahimmassa tapauksessa rakenteessa tapahtuneesta pysyvästä muutoksesta (rakenteen heikentymisestä). Antureita ei kuitenkaan kannata nollata jokaisen vaiheen välissä, koska oleellista informaatiota voidaan menettää. Tämä voidaan tehdä kuitenkin tarvittaessa koekuormitusvaihe kerrallaan tulosten jälkikäsittelyn yhteydessä.

Taulukko 9 on esitetty koekuormituksen eri vaiheissa mitatut maksimi- ja minimiarvot sillan keskiaukon (SP3) rakenteisiin ja tuelle T3 asennetuille antureille. Anturien lähtötasojen vaihtelun vuoksi antureille on lisäksi määritetty minimien ja maksimien huipusta huippuun arvot (peak-to-peak, p2p). Venymäantureiden (oSg-alkuiset) mittaussyksikkö on mikrovenymä ( $\mu\epsilon$ ), siirtymämittauksen (D) mikrometri ( $\mu\text{m}$ ) ja taipumamittauksen (Laser) millimetri (mm). Sekä taulukon mittaustuloksista että Kuva 51 voidaan huomata, että teräspalkin ylälaipassa venymät ovat kuormitustilanteessa lähes olemattomia. Ylälaippa puristuu vain hieman kuormitustilanteessa. Tämä johtunee siitä, että sillan neutraaliakseli sijaitsee teräspalkin ylälaipan alapuolen lähetyvillä, koska betonikansi osallistuu poikkileikkauksen toimintaan osittaisen liittovaikutuksen kautta. Siirtymäanturin D 19 mitaamat tulokset osoittavat kansilaatan ja teräspalkin välisen pituussuuntaisen liikkeen olleen myös lähes olematonta. Taulukko 10 on esitetty teräsosiin kiinnitettyjen venymäantureiden mittaustulokset jännityksinä, kun teräksen kimmokerroin on 210 GPa. Liitteessä I on mittaustulokset antureille, joita taulukossa 9 ei ole esitetty.

**Taulukko 9.** Antureiden minimi, maksimi ja niiden p2p-arvot kuormitusvaiheittain koekuormituksessa A (21.4.2016).

Alalaippa				Ylälaippa		Kansilaatta		Uuma
	oSgL 2	oSgS 3	oSgP 21	oSgP 22	oSgP 6	oSgS 5	D 19	Laser 17
	Venymä [μϵ]						Siirtymä [μm]	Taipuma [mm]
A1								
max	127	119	128	3	32	24	13	6
min	-22	-24	-23	-6	-3	-6	-3	-17
p2p	149	143	151	9	35	31	15	23
A2								
max	51	48	50	4	28	25	2	3
min	-17	-16	-13	-3	-2	-2	-7	-9
p2p	68	64	63	6	30	27	9	12
A3								
max	161	158	167	4	36	35	6	5
min	-17	-17	-16	-7	0	4	-12	-25
p2p	178	175	183	10	36	31	18	30
A4								
max	118	116	124	4	28	33	0	5
min	-17	-20	-15	-4	2	7	-12	-15
p2p	135	136	139	8	26	26	12	20
A5								
max	165	157	172	4	65	64	-1	8
min	-18	-23	-17	-7	3	12	-14	-21
p2p	182	181	189	11	62	52	15	29
A6								
max	118	112	126	3	51	56	1	6
min	-12	-18	-7	-3	3	18	15	-14
p2p	130	130	133	6	48	38	16	20

**Taulukko 10.** Teräsosiin kiinnitettyjen venymäantureiden mittaustulokset muunnettuna jännityksiksi (koekuormitus A 21.4.2016).

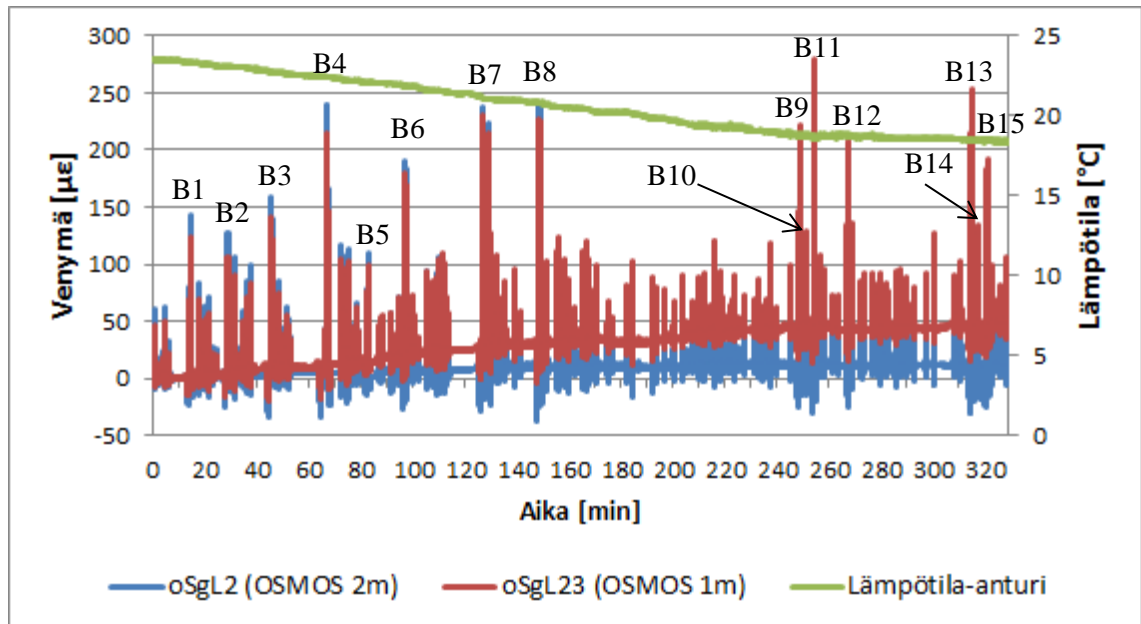
	Alalaippa			Ylälaippa	Kansilaatta
	oSgL 2	oSgS 3	oSgP 21	oSgP 22	oSgS 5
	Jännitys [MPa]				
<b>A1</b>					
max	26.7	25.0	26.9	0.7	5.1
min	-4.6	-5.0	-4.8	-1.2	-1.4
p2p	31.3	30.0	31.7	1.9	6.5
<b>A2</b>					
max	10.6	10.2	10.4	0.8	5.3
min	-3.6	-3.3	-2.8	-0.6	-0.4
p2p	14.2	13.4	13.2	1.4	5.7
<b>A3</b>					
max	33.7	33.2	35.2	0.8	7.3
min	-3.6	-3.6	-3.3	-1.4	0.9
p2p	37.3	36.7	38.5	2.2	6.5
<b>A4</b>					
max	24.8	24.3	26.0	0.8	7.0
min	-3.5	-4.3	-3.2	-0.8	1.5
p2p	28.2	28.6	29.2	1.6	5.4
<b>A5</b>					
max	34.5	33.1	36.1	0.8	13.4
min	-3.7	-4.9	-3.6	-1.5	2.5
p2p	38.2	38.0	39.7	2.2	10.9
<b>A6</b>					
max	24.8	23.6	26.4	0.6	11.8
min	-2.5	-3.7	-1.5	-0.7	3.7
p2p	27.3	27.3	27.9	1.3	8.0

### 5.4.2 Tulokset: koekuormitus B

Koekuormitus B:n mittaustuloksista tarkasteltiin keskiaukon (SP3) eteläisen teräspalkin alalaipan venymiä. Kuva 52 on havainnollistettu venymien suuruuksia koekuormituksen B aikana. Koska koekuormitus oli kestoaltaan huomattavasti pidempi kuin ensimmäinen koekuormitus, ei kuvaaja ole yhtä selkeä. Taulukko 11 on esitetty koekuormitus B:n maksimit, minimi ja p2p-arvot. Anturin oSgLW 24 mittaustieto ei tallentunut neljässä koekuormitusvaiheessa. Taulukossa 12 on esitetty mittaustulokset jännityksinä, kun teräksen kimmokerroin on 210 GPa. Liitteessä J on mittaustulokset antureille, joita taulukossa 11 ei ole esitetty.

Koekuormituksessa vaihe B12 suoritettiin sillan nopeana yliajona. Kyseistä kuormitusvaihetta vastaava pysähdysin suoritettu kuormitusvaihe oli B9. Vertailtaessa näitä kahden kuormitusvaihetta, ei niiden mittaustuloksissa ole suurta eroa. Antureiden mittaustaajuus oli 100 Hz. Tämän perusteella voitaisiin päätellä, etteivät kuormitusvaiheet tarvitse pysähtymistä, jos antureiden mittaustaajuus on riittävä.





**Kuva 52.** Venymien suuruusluokka keskiaukon teräspalkin alalaipassa koekuormituksen B aikana.

**Taulukko 11.** Keskiaukon (SP3) teräspalkin alalaipan antureiden maksimit, minimi- ja niiden p2p-arvot kuormitusvaiheittain koekuormituksessa B (21.6.2016).

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
<b>Venymä [µε]</b>															
<b>max</b>															
oSgL 2	143	128	159	239	110	191	237	239	214	115	270	203	248	124	183
oSgL 23	123	106	141	214	100	179	230	227	221	129	279	207	253	135	192
oSgLW 24	155	136	170	251	-	201	250	251	224	120	284	210	0	0	0
<b>min</b>															
oSgL 2	-23	-25	-34	-34	-14	-26	-29	-37	-25	-15	-30	-26	-30	-19	-25
oSgL 23	-15	-17	-20	-18	3	-3	0	-4	17	25	14	16	16	24	19
oSgLW 24	-26	-31	-13	-41	-	-31	-35	-42	-29	-20	-35	-29	-	-	-
<b>p2p</b>															
oSgL 2	165	152	192	273	124	217	266	276	239	130	300	228	278	143	208
oSgL 23	138	123	161	232	97	182	230	231	204	104	265	191	237	111	173
oSgLW 24	180	167	182	292	-	232	284	293	252	140	319	238	-	-	-

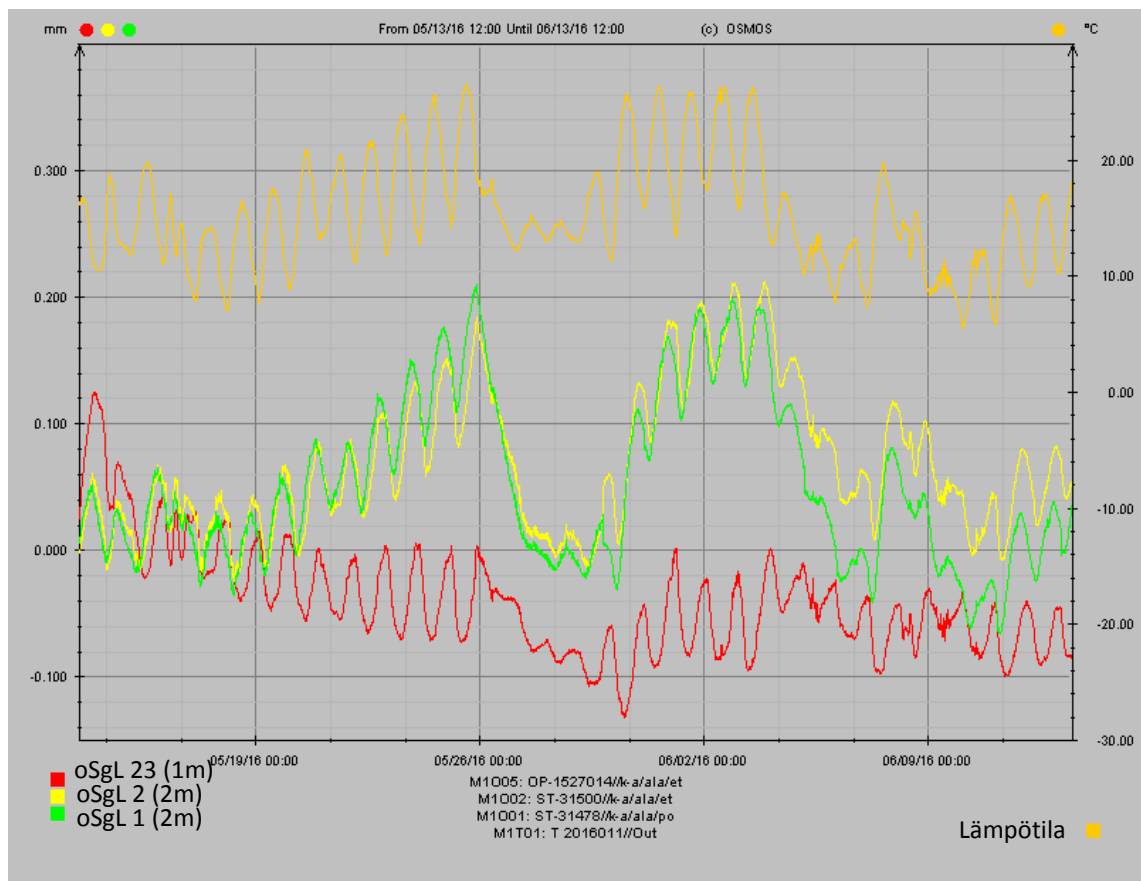
**Taulukko 12.** Keskiaukon (SP3) teräspalkin alalaipan antureiden mittaustulokset muunnettuna jännityksiksi (koekuormitus B 21.6.2016).

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
<b>Jännitys [MPa]</b>															
<b>max</b>															
oSgL 2	29.9	26.8	33.3	50.2	23.0	40.1	49.8	50.2	44.9	24.2	56.7	42.5	52.0	26.0	38.3
oSgL 23	25.8	22.3	29.6	44.9	21.0	37.6	48.3	47.7	46.4	27.1	58.6	43.5	53.1	28.4	40.3
oSgLW 24	32.4	28.6	35.6	52.7	-	42.2	52.4	52.7	46.9	25.2	59.6	44.0	0.0	0.0	0.0
<b>min</b>															
oSgL 2	-4.7	-5.1	-7.0	-7.0	-2.9	-5.5	-6.0	-7.7	-5.1	-3.0	-6.2	-5.4	-6.3	-3.9	-5.3
oSgL 23	-3.2	-3.6	-4.2	-3.8	0.6	-0.6	0.0	-0.8	3.6	5.3	2.9	3.4	3.4	5.0	4.0
oSgLW 24	-5.4	-6.4	-2.6	-8.5	-	-6.4	-7.2	-8.7	-6.0	-4.1	-7.2	-6.0	-	-	-
<b>p2p</b>															
oSgL 2	34.7	31.9	40.3	57.2	25.9	45.6	55.8	57.9	50.1	27.2	62.9	47.9	58.3	29.9	43.6
oSgL 23	29.0	25.8	33.8	48.7	20.4	38.2	48.3	48.5	42.8	21.8	55.7	40.1	49.8	23.3	36.3
oSgLW 24	37.8	35.0	38.2	61.2	-	48.6	59.6	61.4	52.9	29.3	66.9	50.0	-	-	-

## 5.5 Normaaliliikenteen vaikutukset (pitkäaikaisessa monitorinnissa)

Normaaliliikenteen vaikutuksia sillalle tutkittiin pysyvien muodonmuutosten sekä dynaamisten tapahtumien suuruuksien ja esiintymiskertojen avulla. Monitorointijakso on otettu kuukauden mittaiselta ajalta alkaen 13.5.2016.

Kuva 53 on Osmos-monitorointijärjestelmän kuvaaja pysyvistä muodonmuutoksista keskiaukon (SP3) antureille oSgL 1, 2 ja 23. Anturit oSgL 2 ja 23 sijaitsivat eteläisen teräspalkin alalaipassa. Anturi oSgL 1 sijaitsi pohjoisen teräspalkin alalaipassa. Antureiden venymäarvot vaihtelevat pääosin lämpötilan päivävaihtelujen mukana eikä pysyviä muodonmuutoksia ole havaittavissa. Ainoastaan anturin oSgL 23 pysyvien muodonmuutoksen yleiskehitys on alaspäin, joka voi johtua pysyvästä vääntörasituksesta. Vääntörasitukseen johtavia syitä on käyty läpi luvussa 6.1.



**Kuva 53.** Pysyvien muodonmuutosten kuvaaja ajalta 13.5 – 13.6.2016.

Taulukko 13 on Osmos-monitorointijärjestelmän antureille määrittämät dynaamisten tapahtumien esiintymiskerrat ja suuruudet. Taulukkoa luettaessa tulee ottaa huomioon, että monitorointijärjestelmä ilmoittaa venymät koko anturin pituudelta. Jotta venymäarvot saadaan mikrovenymiksi, tulee kahden metrin mittaisen antureiden venymälukemat puolittaa. Tämän vuoksi eripituisten antureiden dynaamisten tapahtumien toistuvuutta

on suoraan hankala vertailla. Anturien oSgL 1 ja 2 dynaamisten tapahtumien esiintymiskerrat ovat samaa suuruusluokkaa. Anturin oSgL 1 suurin p2p-arvo vastaa lähinnä koekuormitusvaihetta B15, jossa lavetti ajoi 176 tonnin kokonaismassalla keskellä sillaa. Vastaavasti anturin oSgL 2 suurin p2p-arvo on verrattavissa koekuormitusvaiheisiin A5 ja B9, joissa 8- ja 9-akseliset ajoneuvoyhdistelmät (kokonaismassa noin 145 tonnia) olivat sillalla rinnakkain. Näinä aikoina sillalla on ollut joko yksi tosi raskas ajoneuvo tai raskaat ajoneuvot molemmilla kaistoilla menossa eri suuntiin. Vertailtaessa vuonna 2015 määriteltyn KVL:seen (12144), mittausten antamat dynaamiset tapahtumat eivät täsmää. Monitoroinnilla mitattujen dynaamisten tapahtumien esiintymiskerrat (1249 kpl) ovat kumminkin hyvin lähellä raskaiden ajoneuvojen osuutta (1457 kpl) vuoden 2015 KVL:stä. Monitorointijärjestelmän dynaamisten tapahtumien raja-arvoksi oli asetettu 0,05 mm. Tämän vuoksi kevyempien ajoneuvojen aiheuttamat dynaamiset tapahtumat eivät ole tallentuneet monitorointijärjestelmään.

**Taulukko 13.** Dynaamiset tapahtumat ja niiden esiintymiskerrat ajalta 13.5. – 13.6.2016.

	Venymäalue [mm]						
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5		
Anturi	Tapahtumakerrat					Suurin p2p-arvo	Suurimman p2p-arvon ajankohta
oSgL 1	26948	9999	2981	27	1	0.409	9.6.2016 klo 15:20:20
oSgL 2	26892	9113	2682	17	0	0.363	18.5.2016 klo 04:09:19
oSgL 23	22390	266	0	0	0	0.149	18.5.2016 klo 04:09:20

Sillan ominaistaajuus saatiin määritettyä tutkimalla normaaliliikenteen aiheuttamia dynaamisia tapahtumia monitorointijärjestelmän analysointiohjelmalla. Analysoitavaksi valittiin tarkastelujakson suurin dynaaminen tapahtuma. Sillan ominaistaajuudeksi saatiin 1,7 Hz.

## 6. ANTURIVERTAILU

Anturivertailun kannalta ei ole katsottu järkeväksi analysoida kaikkien antureiden tuloksia. Mittaustulosten vertailu tehtiin keskiaukon (SP3) rakenteisiin asennettujen anturien välillä. Teräspalkkiin asennetut anturit olivat sillan eteläisellä puolella (oikean kaistan puoli). Pääasiallisesti antureiden vertailemiseen käytettiin mitta-arvoista määritettyjä p2p-arvoja. Mittaustulosten vertailun lisäksi luvussa 7.1 on käyty läpi kokemuksia koekuormituksessa käytettyjen antureiden asennuksesta ja käytettävyydestä koekuormitus-tilanteessa.

### 6.1 Teräspalkin venymät ja taipumat

Koekuormituksen A aikana sillan keskiaukon kohdalla teräspalkkiin oli asennettuna viisi anturia: kolme venymäanturia alalaipassa (Kuva 54), yksi venymäanturi ylälaipassa ja yksi taipuma-anturi uumassa. Vastaavasti koekuormituksen B aikana teräspalkin alalaipassa oli mittaamassa kolme venymäanturia (Kuva 55). Aluksi esitellään yhden kuormitusvaiheen kuvaajat molemmista koekuormituksista. Tämän jälkeen on esitetty antureiden p2p-arvot pylväsdiagrammeina jokaiselle kuormitusvaiheelle. Lisäksi on vertailtu teräspalkin venymien ja taipumien yhdenmukaisuutta.

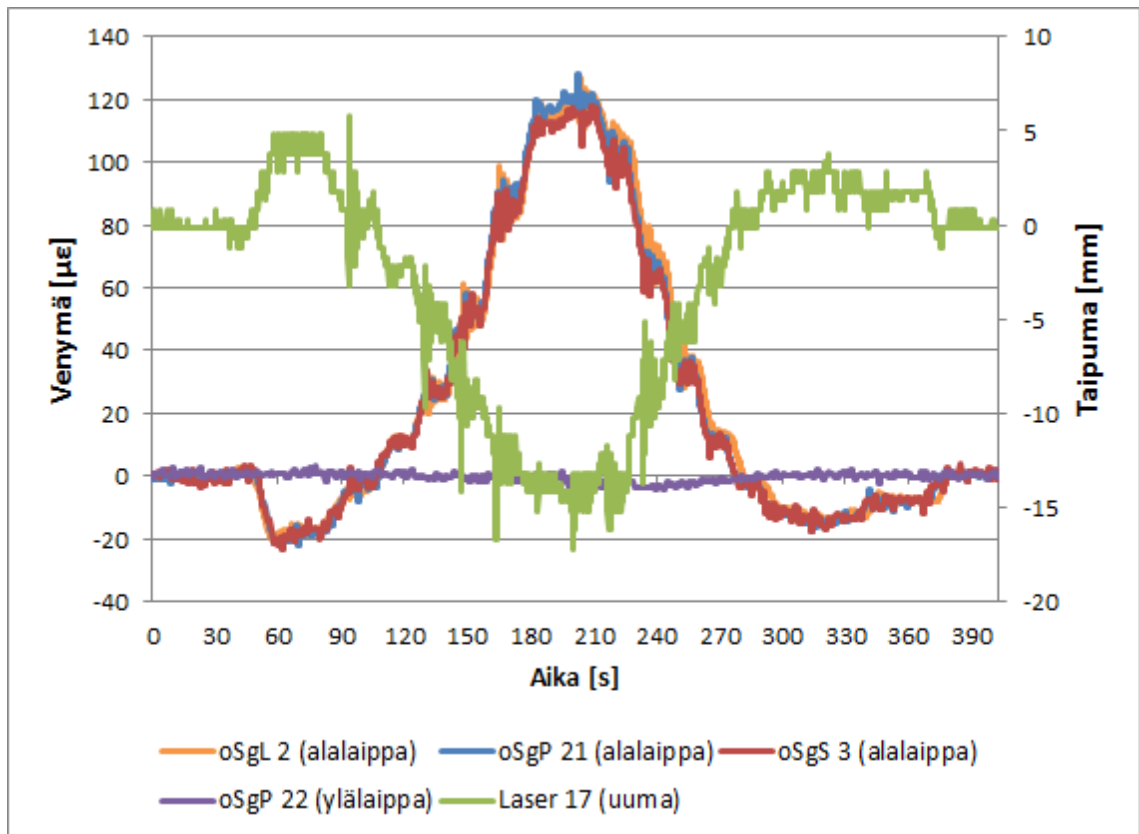


**Kuva 54.** Koekuormituksen A teräspalkin alalaipan venymäanturit. Ylhäällä oSgL 2 (lähimpänä uumaa), keskellä oSgS 3 ja alhaalla oSgP 21.



**Kuva 55.** Koekuormituksen B teräspalkin alalaipan venymäanturit. Ylhäällä oSgL 2 (lähimpänä uumaa), keskellä oSgLW 24 ja alhaalla oSgL 23.

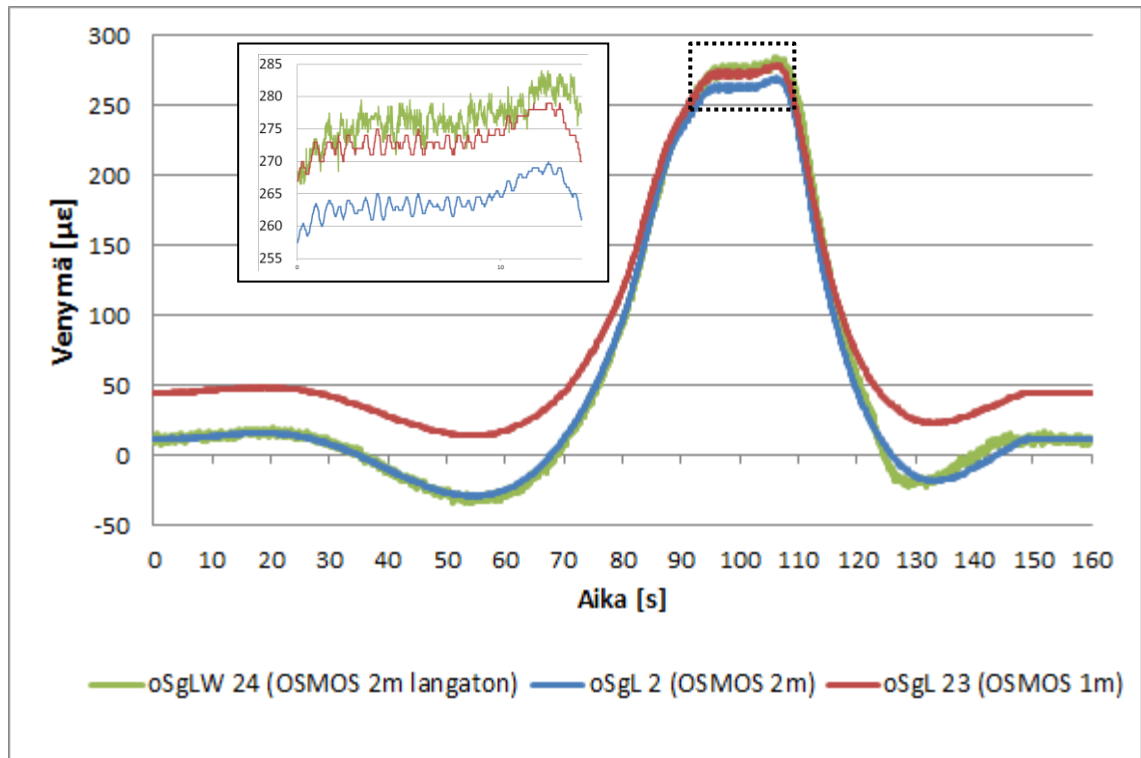
Kuva 56 on esitetty antureiden mittausarvojen muutokset kuormitusvaiheen A1 aikana. Alalaipan venymäanturit muodostavat hyvin samanlaiset kuvaajat. Taipuma-arvot mu-  
kailevat myös alalaipan venymäarvoja. Negatiivinen taipuma-arvo teräspalkissa vastaa venymää alalaipassa. Kuormituksen alussa alalaippa puristuu ja taipuu ylöspäin aiheut-  
taen venymässä negatiivisia arvoja ja taipumassa positiivisia arvoja. Kuten jo aiemmin  
huomattiin, ylälaipassa mittausarvojen muutokset ovat hyvin pieniä. Kuormitusvaihees-  
sa A1 ajoneuvo pysähtyi 6 metrin välein sillan keski- ja reuna-aukoissa. Pysähdykset  
aiheuttavat kuvaajaan säännöllisin välein ”kohinaisia” alueita. Tämä johtuu siltaraken-  
teen värähtelystä ajoneuvon pysähtyessä. Venymäarvoihin pysähdykset eivät vaikuta  
merkittävästi, mutta taipuma-arvoissa pysähdyksen aiheuttama värähtely on huomatta-  
va. Taipumamittaukseen käytetty tasolaser oli asetettu välituelle 4, joka on osaltaan voi-  
nut ottaa värähtelyjä vastaan. Sekä venymä- että taipuma-arvot asettuvat ajoneuvon ol-  
tua pysähdyksissä useamman sekunnin.



**Kuva 56.** Kuormitusvaiheen A1 mittausarvot teräspalkkiin asennetuille antureille keskiaukossa (SP3).

Kuva 57 on nähtävissä tyypillinen mittauskuvaaja koekuormituksen B tuloksena. Ajo-  
neuvo eteni kävelynopeutta sillan keskiaukolle (SP3), jossa se pysähtyi hetkeksi ennen  
kuin jatkoi jälleen kävelynopeutta sillan päähän. Jokaisen anturin venymien maksimit  
ovat samaa suuruusluokkaa siitä huolimatta, että anturin oSgL 23 lähtötaso on noin 30  
µε korkeammalla kuin kahden muun anturin lähtötasot. Lisäksi alussa tapahtuva puris-  
tuma ei ole oSgL 23:n kohdalla yhtä suurta. oSgL 23 sijaitsi kauimpana teräspalkin uu-

masta, jossa muodonmuutosten pitäisi ollakin pienempiä kuin lähempänä uumaa. Jos kaikkien antureiden lähtötasot nolaa, on anturin oSgL 23 maksimimuodonmuutokset pienimmät.

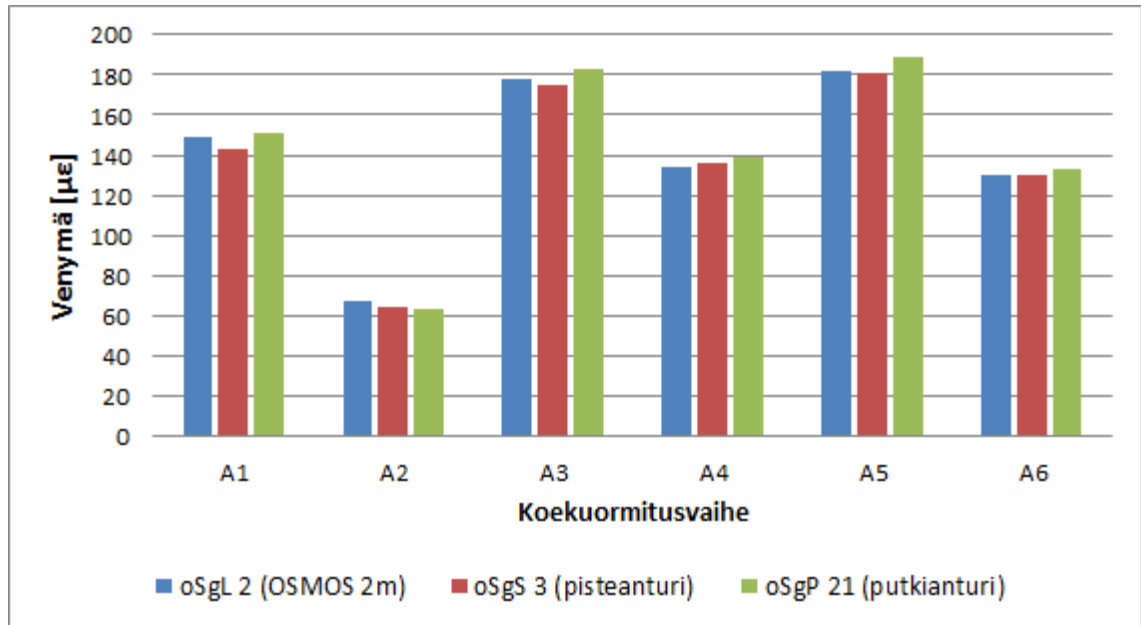


**Kuva 57.** Kuormitusvaiheen B11 venymät teräspalkin alalaipalle keskiaukossa (SP3).

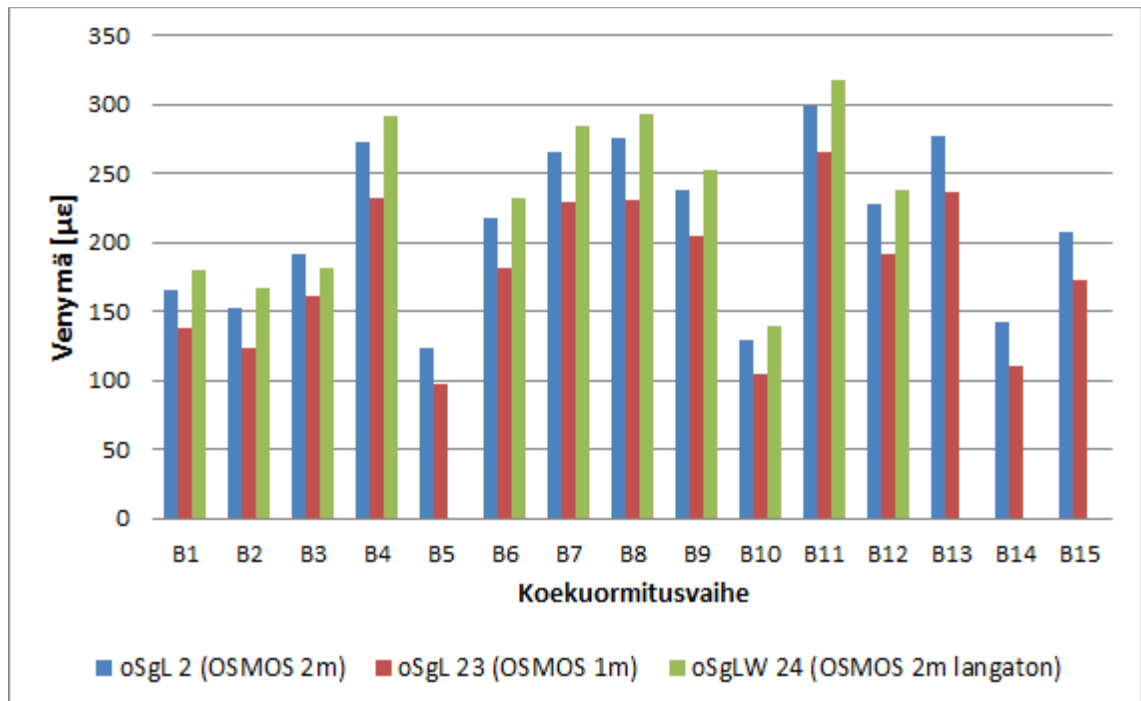
Kuva 58 on esitetty koekuormituksen A venymäantureiden p2p-arvot. Arvoissa ei ole nähtävissä suuria eroavaisuuksia. Antureiden oSgL 2 ja oSgS 3 p2p-arvot ovat hyvin lähellä toisiaan. Vastaavasti anturi oSgP 21 mittasi lähes jokaisessa kuormitusvaiheessa suurempia lukemia. Ainoastaan tilanteessa, jossa kuormitusajoneuvo ajoi sillan vasenta kaistaa (pohjoinen puoli), oSgP 21 antoi alhaisemman tuloksen kuin kaksi muuta anturia. Tämä ei selity anturin oSgP 21 rakenteellisella sijainnilla, koska anturi on asennettu kauimmaksi teräspalkin uumasta sekä lähimmäksi neutraaliakselia. Tähän voi kuitenkin vaikuttaa teräspalkille tuleva vääntörasitus johtuen kuorman hyvin epäkeskisestä sijainnista. Asian selvittäminen vaatisi vertailua tarkkoihin FEM-laskentatuloksiin. Lisäksi lyhyemmät anturit voivat antaa joskus suurempia mittaustuloksia kuin pitkät anturit. Erot mittaustuloksissa voivat johtua myös muun muassa teräspalkin muodosta ja asennustavasta (pultit), jolloin anturin kiinnitys on mennyt vinoon tai keskilinjalta hieman sivuun.

Kuva 59 on esitetty koekuormituksen B venymäantureiden p2p-arvot. Mittaustuloksissa on havaittavissa systemaattinen ero, joka toistuu melkein jokaisessa kuormitusvaiheessa. Anturin oSgL 23 p2p-arvot ovat noin 30 µε pienempiä ja anturin oSgLW 24 noin 15 µε suurempia kuin anturin oSgL 2 arvot. Anturi oSgL 23 on puolta lyhyempi malli antu-

rista oSgL 2. Kyseisten antureiden pitäisi mittauseräilyksiltään olla samanlaisia. Pienemmät arvot voivat selittyä sen sijainnilla alalaipassa. Kokemusperäisesti on myös havaittu, että lyhyemmät anturit ovat herkempiä sen suhteen, miten tarkkaan kuormitusajoneuvo on saatu kuormitusasentoon. Anturin oSgLW 24 mittauservot tukevat anturivalmistajan ilmoittamaa mittauserkkuutta.



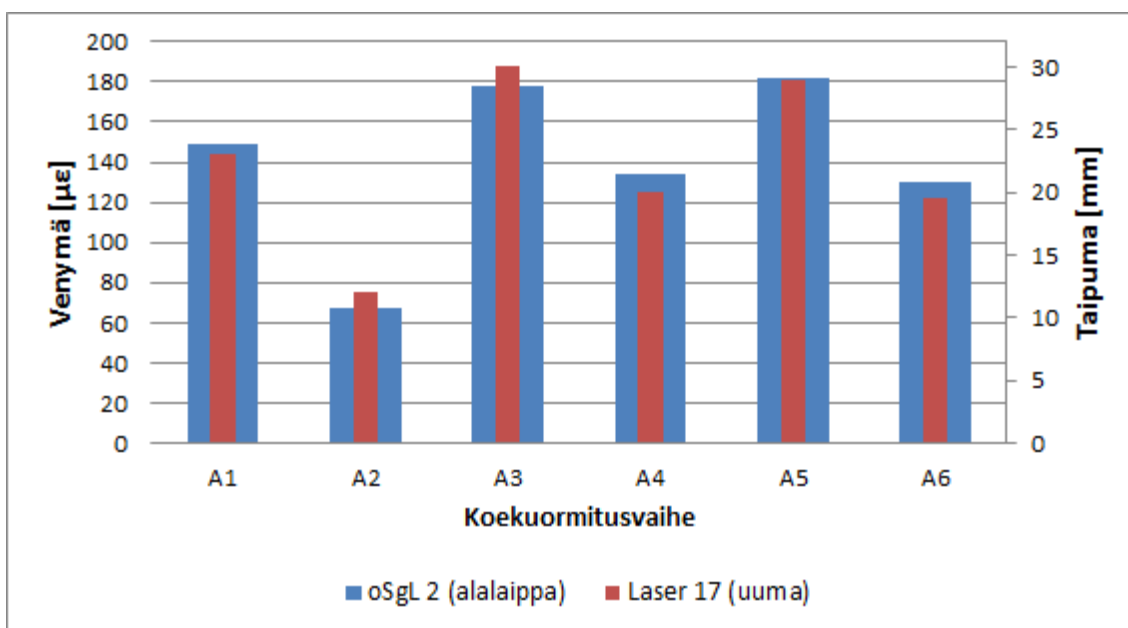
**Kuva 58.** Teräspalkin alalaipan venymäantureiden p2p-arvot koekuormituksessa A.



**Kuva 59.** Teräspalkin alalaipan keskiaukon (SP3) venymäantureiden p2p-arvot koekuormituksessa B.



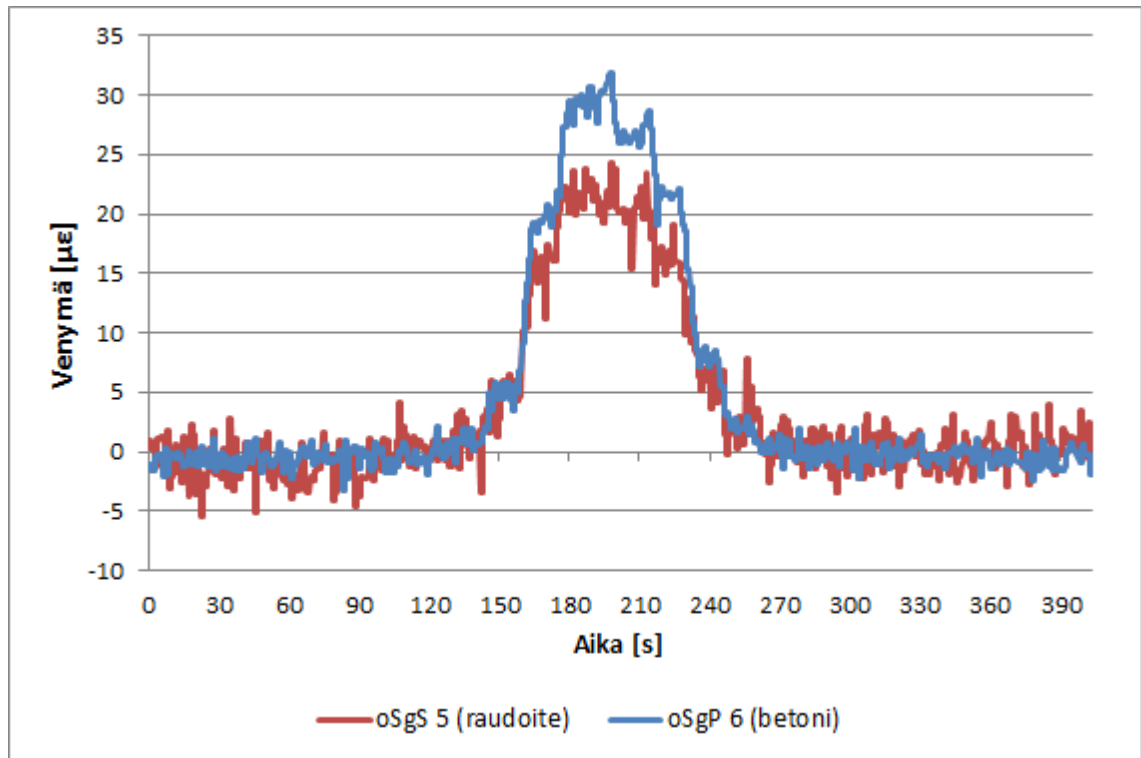
Kuva 60 on vertailtu teräspalkin alalaipan venymän ja uuman taipuman p2p-arvojen suuruusluokkaa koekuormituksessa A. Mittaustulosten sovittamisessa ei ole käytetty laskentamallia, vaan ainoastaan määritettyjä p2p-arvoja sopivan vertailutason löytämiseksi. Venymän ja taipuman mittaustulokset mukailevat toisiaan eri kuormitusvaiheissa. Taipumatulokset eroavat suurimmillaan 1,5 mm venymäarvojen tasoista. Taipumamittauksessa (Laser 17) p2p-arvojen heittelyyn voi vaikuttaa tasolaserin tason eläminen, joka korostuu pidemmällä etäisyyksillä. Taipumamittauksessa käytetyn DMM-yksikön etäisyys tasolaseriin oli noin 30 m. Yleisesti venymä ja taipuma eivät kuitenkaan ole suoraan verrannollisia keskenään niihin vaikuttaessa suureiden vaikutusviivojen erilainen muoto ja siten kuormituksen muoto sillan pituussuunnassa.



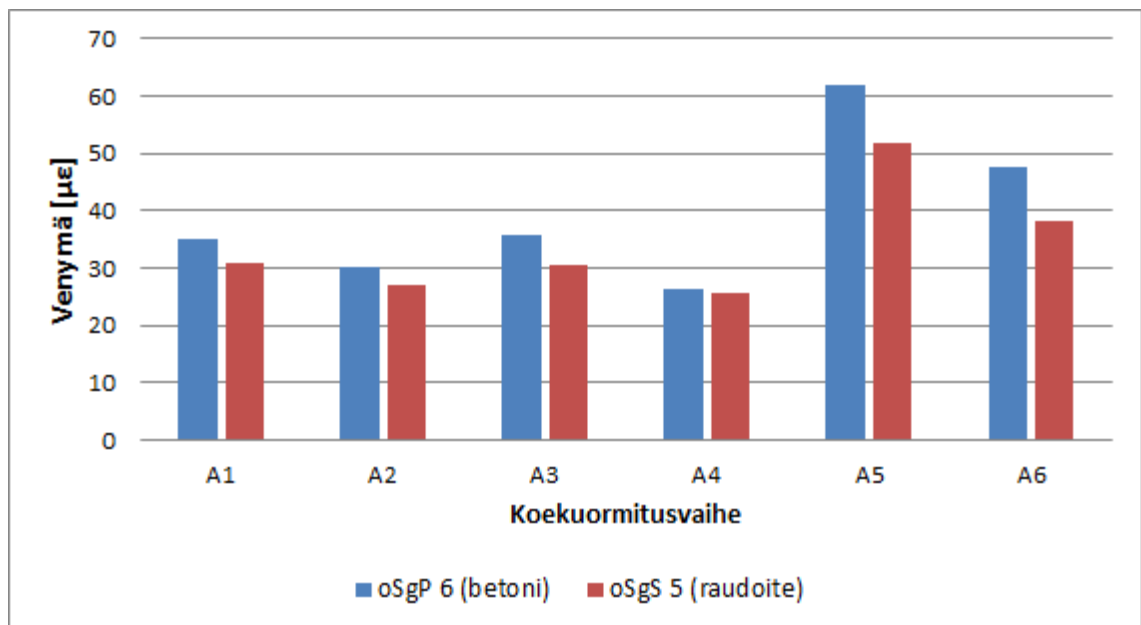
*Kuva 60. Teräspalkin venymän ja taipuman p2p-arvot koekuormituksessa A.*

## 6.2 Kansilaatan venymät

Koekuormituksen A aikana sillan keskiaukon kohdalla kansilaatassa oli mittaamassa kaksi venymäanturia: oSgS 5 poikittaisessa raudoitettangossa ja oSgP 6 betonin pinnassa. Kuva 61 on esitetty kuormitusvaiheen A1 mittaustulokset molemmille antureille. Kuvaajasta on nähtävissä, että raudoitettankoon asennetun anturin (oSgS 5) mittausravot ovat kohinaisempia kuin betoniin asennetun anturin (oSgP 6) mittausravot. Mittaustulos vastaa hyvin muiden kuormitusvaiheiden mittaustuloksia, joiden p2p-arvot on nähtävissä Kuva 62. Kuormitusvaiheessa A4 venymät ovat pienimmillään, jolloin betonin ja raudoitteen venymät ovat lähes yhtä suuret. Kuormitusvaikutuksen ja venymien kasvaessa betoni venyy suhteessa enemmän kuin raudoite, mikä näkyy mittaustuloksissa. Tämä on rakenteen normaalia toimintaa betonipoikkileikkauksen suhteen, koska betoni-pinta sijaitsee kauempana neutraaliakselista kuin raudoitettanko.



**Kuva 61.** Koekuormitusvaiheen A1 venymät kansilaatan antureille.



**Kuva 62.** Kansilaatan alapinnan venymäantureiden p2p-arvot koekuormituksessa A.

### 6.3 Kohinan keskihajonta

Antureiden kohinan suuruutta arvioitiin määrittämällä keskihajonnat kuormittamattomassa tilanteessa. Taulukko 14 on esitetty keskihajonnat tarkastelun alla oleville antureille molemmissa koekuormituksissa. Näytejoukkona käytettiin 400 peräkkäistä mittausarvoa. Luvuista nähdään, että oSgL-anturilla oli alhaisin kohina. Vastaavasti suurin kohina venymäantureista oli oSgS-antureilla. Langattomalla venymäanturilla (oSgLW) kohina oli hieman matalampi kuin oSgS-antureilla. oSgP-antureilla kohina oli noin puolet pienempi kuin vastaavalla toimintaperiaatteella toimivalla oSgS-anturilla. Taipumamittauksen (Laser) kohinan suuruus vastasi mittalaitteelle annettua mittaustarkkuutta (0,5 mm).

**Taulukko 14.** Antureiden keskihajonnat kuormittamattomassa tilanteessa.

Keskihajonta $\sigma$		
	Koekuormitus A	Koekuormitus B
<b>Alalaippa [<math>\mu\epsilon</math>]</b>		
oSgL 2	0,25	0,26
oSgL 23		0,37
oSgLW 24		1,48
oSgP 21	0,85	
oSgS 3	1,77	
<b>Ylälaippa [<math>\mu\epsilon</math>]</b>		
oSgP 22	0,66	
<b>Kansilaatta [<math>\mu\epsilon</math>]</b>		
oSgP 6	0,75	
oSgS 5	1,9	
<b>Uuma [mm]</b>		
Laser 17	0,46	

## 7. POHDINTA

### 7.1 Kokemukset antureista

#### Asennus

Antureiden asennuksissa tulee olla huolellinen kiinnityskohtien mittaamisessa. Tämä pitää huomioida varsinkin silloin, kun pitkä kuituanturi kiinnitetään kahdesta kaukana toisistaan olevasta kiinnityskohdasta.

Käytettäessä liimaa OSMOS-antureiden (oSgL, oSgLW) asennuksessa, anturin aluslevy on siinä mihin se liimataan. Ruuvikiinnityksellä aluslevyn asennuskohtaa pystyy tarvittaessa vielä hieman muuttamaan. Micron Opticsin anturit (oSgS, oSgP) asennettiin pääasiassa pistehitsauksella ja magneeteilla, jonka jälkeen ne olivat käyttövalmiita. OSMOS-anturit piti erikseen esijännittää kalibrointikireyteen aluslevyjen välille.

Kaapelivetojen osalta oSgL-antureiden (OSMOS) etuna oli jäykkään putkeen suojatut tiedonsiirtokuidut. Haittana puolestaan oli, että jokainen anturi tarvitsee oman tiedonsiirtokuitunsa. Vastaavasti Micron Opticsin anturit pystytään kytkemään sarjaan, joten tarvitaan vain yksi tiedonsiirtokuitu samassa linjassa oleville antureille. Tiedonsiirtokuitu ei ollut valmiiksi suojattu, joten pitempiäaikaisissa asennuksissa suojaustarve joudutaan ottamaan huomioon.

Alun perin taipumamittauksen (Laser) DMM-yksikön asennus oli suunniteltu teräspalkin alalaippaan, mutta silloin tasolaserin asentaminen olisi hankaloitunut. Asennussuunnitelmia muutettiin siten, että DMM-yksikkö asennettiin magneeteilla teräspalkin uumaan tasolaserin ollessa välituella.

Kaiken kaikkiaan antureiden asennus tapahtui sujuvasti. Erilaisia antureita asennettaessa tulisi sillalla vallitsevat olosuhteet ottaa huomioon jo monitorointia suunniteltaessa. Anturointisuunnitelmasta olisi hyvä olla luonnos jo sillalla vierailun yhteydessä, jotta kaikki epäkohdat voitaisiin huomata.

#### Anturien tarkkuustaso

Työn monitoroinnissa käytetyt anturit valikoituivat palvelutoimittajien kautta. Anturien valinnassa käytettiin hyväksi myös aikaisempia koekuormitustuloksia. Käytetyt venymäanturit, lukuun ottamatta langatonta mallia, ovat tarpeeksi tarkkoja käytettäväksi siltojen kantavuusmittauksiin. Venymäanturien tarkkuustaso olisi hyvä olla noin  $\pm 2 \mu\epsilon$ . Kansilaatan ja teräspalkin välisen pituussuuntaisen liikkeen tiedettiin olevan hyvin pien-

tä, joten siirtymäanturi valittiin sen mukaan. Siirtymäanturin tapauksessa 10 µm tarkkuus on riittävä. Taipumamittaukseen käytetyn anturin tarkkuus (0,5 mm) oli myös kenttämittaauksissa monitoroidulle sillalle riittävä. Parempi tarkkuustaso taipumamittauksen osalta voisi tulla kyseeseen monitoroitaessa teräsbetonista siltaa, jossa taipumat ovat hyvin minimaalisia.

### **Soveltuvuus koekuormitukseen**

Tiedonsiirtokuiduilla ja -kaapeleilla mittalaitteisiin yhdistetyt anturit toimivat moitteetta koko mittauksen ajan. Näiltä osin käytetyt anturit sopivat koekuormitustilanteisiin, jos antureiden antamat mittaussuureet ovat tarkoituksenmukaisia kantavuustarkastelua ajatellen. FBG-antureiden mittalaitteen mittaustaajuus oli 2 Hz, joka omalla tavallaan rajoittaa koekuormitustilannetta. Kyseinen mittalaite ei sovellu esimerkiksi tilanteeseen, jossa kuormitusajoneuvolla ajetaan sillan yli nopeudella 60 km/h.

Antureiden langattomuus tuo aina omat haasteensa mittaustilanteeseen. oSgLW-antureita ei saatu toimimaan ensimmäisessä koekuormituksessa halutulla tavalla, joten siitä ei myöskään kyseisillä antureilla saatu dynaamisia mittaustuloksia. Toisessa koekuormituksessa dynaamisten mittaustulosten tallennus varmistettiin langattomalla reaaliaikaisella yhteydellä tietokoneen ja yhden oSgLW-anturin välillä. Tästä huolimatta toisessa koekuormituksessa mittaustuloksia jäi saamatta neljästä kuormitusvaiheesta. Monitorointijakson ja koekuormitusten perusteella oSgLW-antureilla on ongelmia rekisteröidä dynaamisia tapahtumia. Vastaavasti staattiset mittaustulokset anturit tallentavat ongelmitta. Anturit ovat tulleet markkinoille alkuvuodesta 2016, joten niiden toimivuuden luotettavuus ei ole sillä tasolla, että niitä kannattaisi käyttää siltojen monitoroinnissa tällä hetkellä.

## **7.2 Ehdotus pitkäaikaisesta anturoinnista**

Keltin sillan käyttöikä on jäljellä arviolta 10 vuotta. Aika on niin pitkä, ettei pitkäaikaiseksi jatkuvan monitoroinnin anturoinniksi kannata ajatella langatonta järjestelmää. Jatkuvan monitoroinnin anturikokoonpanon ja laajuuden tulisi olla tarpeeksi kattava sillan rakenteellisen tilan seuraamiseksi. Suurimmat hyödyt saataisiin tekemällä sillalle lujuuslaskennat ja sitä kautta määrittämällä raja-arvot antureille. Toisaalta jo suoritettut koekuormitukset antavat suuntaa raja-arvojen määrittämiselle. Koska siltaan on jo asennettu Osmos-monitorointijärjestelmä, kannattaisi sen vapaana olevia anturipaikkoja hyödyntää.

Sillassa on tällä hetkellä asennettuna neljä (4) jatkuvan monitoroinnin mahdollistavaa tiedonsiirtokuidullista venymäanturia (oSgL 1, 2, 10 ja 14). Anturit sijaitsevat keskiaukon (SP3) molempien teräspalkkien alalaipoissa sekä eteläisen teräspalkin alalaipassa välituella 4 ja reuna-aukossa (SP4). Normaaliliikenteen vaikutuksia tutkittaessa ilmeni, että suurin p2p-arvo on mitattu pohjoisen teräspalkin alalaipasta anturilla oSgL 1. Ky-

seinen anturi on ainoa anturi pohjoisella teräspalkilla. Tämän perusteella voisi olla syytä lisätä kaksi (2) venymäanturia symmetrisesti eteläisen puolen anturoinnin mukaan.

Sillassa olevan liitinelimettömän betonikannen toiminnasta ei olla varmoja. Täten siltaan olisi hyvä lisätä kannen ja teräspalkkien välistä liikettä mittaavat siirtymäanturit tai ekstensiometrit. Kyseisen suureen seurannalla voidaan varmistaa vaikuttaako kannen ja palkkien välinen liike ja mahdollinen jumiutuminen teräspalkkien jännitystiloihin. Siirtymäanturi tulee myös kyseeseen, jos halutaan tarkemmin määrittää sillan keskivuorokausiliikennettä (KVL) BWIM-menetelmällä.

Työn aikana tapahtuneiden mittausten perusteella teräspalkin ylälaipassa tapahtuneet muodonmuutokset olivat hyvin pieniä (maksimi p2p-arvo 11  $\mu\epsilon$ ). Neutraaliakselin paikan seurantaan voitaisiin asentaa yksi venymäanturi teräspalkin ylälaippaan. Lisäksi voisi olla aiheellista varustaa betonikannen alapinta venymäanturilla kannen poikittaisen rasitusten mittaamiseen.

## 8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli esitellä siltojen tarkastustoimintaan liittyvä siltojen monitorointi ja sen tämän hetkinen tila siltojen rakenteellisen kunnan seurannassa. Lisäksi tavoitteena oli selvittää monitoroinnin kokonaiskustannusten muodostumista, monitorointijärjestelmien ja niihin liitettävien antureiden pitkäaikaiskestävyyttä sekä Suomessa tapahtuvan siltojen monitoroinnin haasteita. Työtä varten koekuormitettiin silta kahden eri monitorointipalveluntoimittajan antureiden vertailemiseksi. Tausta-aineistoksi työssä esiteltiin Suomen sillaston nykyistä tilaa ja siihen liittyvää siltojen kuntotarkastustoimintaa.

Liikenneviraston hallintaan kuului vuoden 2015 alussa 15122 tiesiltaa ja 2375 kiskoliikenteen rautatiesiltaa. Teiden ja rautateiden sillat ovat osa liikenneverkkoa. Siltojen täytyy kestää niiden koko käyttöikä, peruskorjauksia lukuun ottamatta keskeytymättömästi, jotta liikenneverkkoon ei tulisi käyttökatkoja. Sillat vaurioituvat ajan kuluessa ympäristöolosuhteiden ja liikenteen rasitusvaikutuksista. Taitorakenteiden yhtenäisen kuntotasotaulukon mukaan siltojen yleinen kunto on tyydyttävällä tasolla. Siltojen kuntoa seurataan kuntotarkastuksilla, joita ovat vuosi-, yleis- ja erikoistarkastus sekä tehostettu tarkkailu. Sillan päätarkastus on yleistarkastus, joka suoritetaan joka viides (5.) vuosi. Sitä käytetään siltojen korjausohjelmoinnin perustana. Jos sillan rakenteessa havaitaan kantavuuteen vaikuttavia vaurioita, silta voidaan koekuormittaa tai asettaa tehostettuun tarkkailuun. Tehostettu tarkkailu voidaan suorittaa monitoroimalla siltaa sen turvallisen käytön jatkamiseksi.

Monitorointi on sillan tai muun taitorakenteen automaattista mittaamista erilaisten antureiden ja mittalaitteiden avulla. Monitoroinnilla saadaan numeerista tietoa sillan todellisesta kunnosta, mekaanisesta käyttäytymisestä ja ulkoisista olosuhteista. Monitorointitietoa voidaan käyttää normaalien kuntotarkastusten apuna sillan kantavuuden, käyttöiän, käyttömukavuuden ja vaurioiden määrittämisessä. Monitorointitieto ohjaa sillan korjauksen tai korvausinvestoinnin optimaalisen ajankohdan valinnassa.

Maailmanlaajuisesti siltojen monitorointia on suoritettu jo 1980-luvulta lähtien lähinnä sillan rakenteellisen toiminnan ymmärtämiseksi. Viimeisen vuosikymmenen aikana monitorointi on yleistynyt siltojen kunnan seurannassa siltakannan vanhentuessa ja rapistuessa korjausrahoituksen riittämättömyyden vuoksi. Monitoroinnin ollessa verrattain uutta eivät käytännöt ole vielä vakiintuneet toimijoiden välillä. Liikennevirasto on vuoden 2016 aikana julkaisemassa monitorointiohjeet sekä tilaajille että toimittajille monitoroinnin suunnittelun ja toteuttamisen helpottamiseksi. Liikennevirasto on ohjeistuksessaan luokitellut monitoroinnin sen keston ja laajuuden mukaan. Monitorointimene-

telmä määrittää monitoroinnin keston, joita ovat jatkuva, jaksottainen ja kertamonitorointi. Monitoroinnin laajuudet on jaettu anturimäärän mukaan erikoislaajaan, laajaan ja suppeaan monitorointiin.

Monitorointijärjestelmiä kehittävät useat tahot. Anturitekniikka ja mittalaitteet kehittyvät jatkuvasti etsittäessä tarkempia ja kustannustehokkaampia ratkaisuja. Kuituoptiset anturit ovat tulleet perinteisten antureiden (esim. sähköiset vastusvenymäliuskat) rinnalle sillan rakenteen käyttäytymisen seurantaan. Kuituoptisen anturin etuna on häiriöttömyys sähkömagneettisille häiriöille ja anturimateriaalin säilyvyys. Monitorointiprojektin kustannuksiin vaikuttavat pääosin monitoroinnin kesto ja monitoroinnin laajuuden valinta. On myös havaittu, että antureiden langattomuudella saavutetaan säästöjä laitekustannuksissa.

Anturien pitkäaikaiskestävyys riippuu anturin laadusta ja sen suojauksesta ympäristörasituksia vastaan. Antureiden vikaantumiset ovat olleet yksittäistapauksia. Vikaantumisia esiintyy yleensä asennuksen yhteydessä tai huonon suojauksen johdosta. Eniten joudutaan kuitenkin uusimaan monitorointijärjestelmien keskusyksiköjä ja virtalähteitä elektroniikan vanhenemisen vuoksi.

Tällä hetkellä haastavinta monitoroinnissa on mittaustulosten käsittely. Monitorointi tuottaa valtavan määrän mittaustietoa, jota ei osata välttämättä hyödyntää. Pahimmassa tapauksessa mittaustuloksia ei analysoida lainkaan. Monitoroinnin tilaaja toivoo saavansa kokonaisvaltaista palvelua, jossa mittaustieto on analysoitu ja tuloksia vertailtu suoraan sillan lujuusmalliin. Lujuusmalli olisi tällöin hyvä saada integroitua monitorointijärjestelmään, jotta mittaustulosten analysointi ja vertailu lujuusmalliin helpottuisi.

Kenttämittauskohteena toimi Keltin silta Kouvolassa. Silta on neliaukkoinen (jännemittat 35 m + 60 m + 60 m + 35 m) teräsbetonikantinen ja 2-palkkinen teräspalkkisilta. Monitorointiprojekti suoritettiin keskitettynä monitorointina. Monitoroinnin lyhytkestoisuuden vuoksi monitorointimenetelmäksi valittiin kertamonitorointi ja laajuutena käytettiin suppeaa monitorointia. Silta instrumentoitiin kahdella eri tekniikalla toimivilla kuituoptisilla venymäantureilla (FBG ja mikrotaipuma) sekä siirtymä- ja taipumaantureilla. Monitoroinnissa käytettiin myös langatonta anturitekniikkaa. Antureiden asennuksissa käytettiin liimaa, kemiallista betonia, magneetteja sekä ruuveja. Kenttämittauskohteelle suoritettiin kaksi erillistä koekuormitusta.

Kenttämittausten anturivertailun osalta tarkasteltiin sillan keskiaukon keskelle teräspalkkiin ja kansilaattaan asennettujen venymä- ja taipumaantureiden toimintaa. Antureiden mittaustulosten vertailemiseksi antureille määritettiin minimien ja maksimien huipusta huippuun (p2p) arvot antureiden lähtötasojen vaihtelun vuoksi. Lähtötasoihin vaikuttivat muun muassa epätäydellinen lämpötilakompensointi (FBG-venymäanturit) ja antureiden sijainti rakenteessa. Merkittävimmät erot kuormitusvaiheiden mittausarvoissa esiintyi teräspalkin venymäantureissa. Mittauserot saattoivat johtua antureiden



asennustavasta, niiden sijainnista rakenteessa, teräspalkin muodosta sekä kuorman epä-keskisestä jakautumisesta. Tarkempi selvitys olisi vaatinut vertailua FEM-laskentatuloksiin. Vertailtaessa antureiden mittaustuloksia anturivalmistajien ilmoittamiin suorituskkytietoihin, ei niissä havaittu suuria eroavaisuuksia. Venymäantureiden vertailu osoitti, että FBG-antureiden kohina oli selkeästi suurempaa verrattuna mikrotaipuma-antureihin.

Koekuormituksissa suurimman venymän p2p-arvon (300  $\mu\epsilon$ ) sillan keskiaukon (SP3) eteläisen teräspalkin alalaippaan aiheutti lavetti 156 tonnin kokonaismassalla. Lavetti ajoi eteläistä kaistaa 30 cm etäisyydellä sillankaiteen johteesta. Normaaliliikenteen aiheuttama suurin venymän p2p-arvo (205  $\mu\epsilon$ ) mitattiin pohjoisella teräspalkilla. Venymä vastasi koekuormitusvaihetta, jossa lavetti ajoi keskellä siltaa 176 tonnin kokonaismassalla. Koekuormitusvaiheet suoritettiin pääosin kävelynopeuksin ja pysähdyksin. Yksi kuormitusvaihe suoritettiin kuitenkin sillan yliajona nopeudella 60 km/h. Vertailtaessa kyseistä kuormitusvaihetta vastaavaan pysähdyksin suoritettuun kuormitusvaiheeseen, ei tuloksissa havaittu juuri eroa. Tämän perusteella mittalaitteiden mittaustaajuuden ollessa riittävän korkea, eivät ne rajoita koekuormitusvaiheiden suorittamista. Normaali-liikenteen dynaamisten tapahtumien perusteella sillan ominaistaajuudeksi määritettiin 1,7 Hz.

Suurimmat erot antureiden välillä tulee esiin niiden asennustavoissa. Mikrotaipumaan perustuvat venymäanturit piti esijännittää kalibrointikireyteen asennusvaiheessa. Vastaavasti FBG-tekniikkaan perustuvat venymäanturit eivät vaatineet erillistä esijännittämistä. Koekuormitusten perusteella tiedonsiirtokaapeleilla toimivat anturit toimivat mittaustilanteessa täydellisesti. Ongelmia esiintyi kuitenkin langattomasti toimivilla venymäantureilla, joilla oli vaikeuksia tallentaa dynaamisia tapahtumia. Täten kiinteästi kaapeleilla mittalaitteisiin yhdistetyt anturit soveltuvat hyvin koekuormitustilanteisiin. Langattomien antureiden toiminta pitää vielä varmistaa ennen kuin niiden käyttöä voidaan suositella siltojen monitoroinnissa. Antureiden tarkkuudet monitoroinneissa olisi hyvä olla venymälle  $\pm 2 \mu\epsilon$ , siirtymälle  $\pm 5 \mu\text{m}$  ja taipumalle  $\pm 0,5 \text{ mm}$ .

## LÄHTEET

Alajoki, V. (2016). Diplomi-insinööri, Projektinjohtaja. Helsingin kaupunki. Haastattelu 10.3.2016.

Agdas, D., Rice, J., Martinez, J. & Lasa, I. (2015). Comparison of Visual Inspection and Structural-Health Monitoring As Bridge Condition Assessment Methods. Journal of Performance of Constructed Facilities. 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000802 , 04015049.

Brownjohn, J. M. W. (2006). Structural health monitoring of civil infrastructure. Philosophical Transactions of the Royal Society. 365, s. 589-622.

Dong, Y., Song, R. & Liu, H. (2010). Bridges Structural Health Monitoring and Deterioration Detection - Synthesis of Knowledge and Technology. Alaska University Transportation Center & Research and Innovative Technology Administration. AUTC #309036. 182 p. Saatavissa: <http://ntl.bts.gov/lib/46000/46100/46191/Y.Dong-Final-Report-309036.pdf>

Dimense Oy. (2014). Ahvenkosken sillan monitorointi, S115. Esittelykalvot. [viitattu 13.4.2016]. Saatavissa: [http://dimense.fi/site/assets/files/1358/ahvenkosken\\_sillan\\_monitorointi-1.pdf](http://dimense.fi/site/assets/files/1358/ahvenkosken_sillan_monitorointi-1.pdf)

Dimense Oy. (2016). DMM-tasomittauslaite. Tuote-esite. [viitattu 13.4.2016]. Saatavissa: [http://dimense.fi/site/assets/files/1342/datasheet\\_dimense\\_dmm\\_july\\_2016\\_finnish.pdf](http://dimense.fi/site/assets/files/1342/datasheet_dimense_dmm_july_2016_finnish.pdf)

Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. (2014). Hanhisen silta koekuormitetaan ja uusitaan Kannuksessa. Tiedotteet. Verkkosivu. [viitattu 23.12.2015]. Saatavissa: <https://www.ely-keskus.fi/web/ely/-/hanhisen-silta-koekuormitetaan-ja-uusitaan-kannuksessa-etela-pohjanmaan-ely-keskus-#.VnpxbRvsmM8>

Federal Highway Administration. (2016). Verkkosivu. [viitattu: 11.3.2016]. Saatavissa: <https://www.fhwa.dot.gov/research/tfhrc/programs/infrastructure/structures/ltp/about.cfm>

French C. E., Hedegaard B., Shield C. K. & Stolarski H. (2011). I35W Collapse, Rebuild and Structural Monitoring – Challenges Associated with Structural Health Monitoring of Bridge Systems. AIP Conference Proceedings. 1335. s. 9-30

Gastineau, A., Johnson, T. & Schultz, A. (2009). Bridge Health Monitoring and Inspection – A Survey of Methods. Department of Civil Engineering University of Minnesota. Final Report. 194 p. Saatavissa: <http://www.lrrb.org/media/reports/200929.pdf>

Hakola, I. (2016). VTT (eläkkeellä). Sähköpostihaastattelu 7.3.2016.

Inaudi, D., Casanova, N., Vurpillot, S., Glisic, B., Kronenberg, P. & Lloret, S. (2001). Lessons Learned in the Use of Fiber Optic Sensor for Civil Structural Monitoring, *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 3-4, pp. 301-320.

Inaudi, D. & Glišić, B. (2008). Overview of 40 Bridge Structural Monitoring Projects Using Fiber Optic Sensors. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics – Koh & Frangopol (eds)*. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46844-2. [viitattu 19.1.2016]. Saatavissa: <http://www.smartec.ch/content/download/931/7547/file/c193.pdf>

Instrumentation Today. (2011). Linear Potentiometer Transducer. Verkkosivu. [viitattu: 30.5.2016]. Saatavissa: <http://www.instrumentationtoday.com/linear-potentiometer-transducer/2011/07/>

Kaista, P. (2015). Puusiltojen suunnittelu. Sweco Rakennetekniikka. Luentokalvot. [viitattu: 11.12.2015]. Saatavissa: [http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Puusillat\\_2015-02-13.pdf](http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Puusillat_2015-02-13.pdf)

Kekki, T. (2013). Puun käyttö siltarakenteissa. Tekninen selvitys. Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisuja C:6. Joensuu. [viitattu 22.12.2015]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/64519/C6final.pdf?sequence=1>

Kim, S. & Frangopol, D. (2011). Cost-Effective Lifetime Structural Health Monitoring Based on Availability. *Journal of Structural Engineering*. 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000280, 22-33.

Kiviluoma, R. (2007). Bridge monitoring demonstrations in the Sustainable Bridges Project - synthesis of results. *Sustainable Bridges, Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives*, Bień J. & Elfgrén, L. & Olofsson, J. (eds.), Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław Poland, pp. 389...396.

Kortesmaa, M. (2007). Rakenteiden mekaniikka. Vol. 40. No. 2. s. 40-47. [viitattu 10.12.2015]. Saatavissa: [http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2007/nro2/RakMek\\_40\\_2\\_2007\\_3.pdf](http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2007/nro2/RakMek_40_2_2007_3.pdf)

Leica Geosystems. (2016). Tuote-esite. [viitattu 14.4.2016]. Saatavissa: [http://hds.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/tps1200/brochures/Leica\\_TPS1200+\\_brochure\\_fi.pdf](http://hds.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/tps1200/brochures/Leica_TPS1200+_brochure_fi.pdf)

Liikenne- ja viestintäministeriö. (2009). Suomen kansallinen liite. SFS-EN 1995-2. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 2: Sillat. [viitattu 11.12.2015]. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/eurokoodit/finnish\\_na\\_en1995\\_2.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/eurokoodit/finnish_na_en1995_2.pdf)

Liikenne- ja viestintäministeriö. (2014). Liikenneväylien korjausvelan vähentäminen ja uusien rahoitusmallien käyttö. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 35/2014. 43 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-436-4>

Liikennevirasto. (2012). Eurokoodin soveltamisohje. Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 5. Liikenneviraston ohjeita 13/2012. 112 s. [viitattu 23.12.2015]. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo\\_2012-13\\_eurokoodin\\_soveltamisohje\\_ncci2\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2012-13_eurokoodin_soveltamisohje_ncci2_web.pdf)

Liikennevirasto. (2013a). Eurokoodin soveltamisohje. Puurakenteiden suunnittelu – NCCI 5. Liikenneviraston ohjeita 25/2013. 76 s. [viitattu 10.12.2015]. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo\\_2013-25\\_ncci5\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2013-25_ncci5_web.pdf)

Liikennevirasto. (2013b). Liikenteen suunta. Liikenne- ja infra-alan T&K-lehti. 4/2013. [viitattu 11.12.2015]. Saatavissa: <http://www.liikenteensuunta.fi/fi/artikkelit/tk/monitoroinnilla-varmistetaan/>

Liikennevirasto. (2013c). Taitorakenteiden tarkastusohje. Liikenneviraston ohjeita 17/2013. 152 s. [viitattu 8.3.2016].

Liikennevirasto. (2015a). Liikenneviraston sillat 1.1.2015. Liikenneviraston tilastoja 10/2015. 164 s. [viitattu: 10.12.2015]. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lti\\_2015-10\\_liikenneviraston\\_sillat\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lti_2015-10_liikenneviraston_sillat_web.pdf)

Liikennevirasto. (2015b). Siltojen kantavuuslaskentaohje. Liikenneviraston ohjeita 36/2015. 104 s.

Liikennevirasto. (2015c). Taitorakenteiden ylläpidon toimintalinjat. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 26/2015. 106 s.

Liikennevirasto. (2016a). Siltojen monitorointikäsikirja. Liikenneviraston oppaita xx/2016. Luonnosversio 43. 107 s. [viitattu: 20.3.2016].

Liikennevirasto. (2016b). Siltojen monitorointiohje. Liikenneviraston ohjeita 18/2016. 48 s.

Lyöri, V. (2007). Structural monitoring with fibre-optic sensors using the pulsed time-of-flight method and other measurement techniques. Dissertation. University of Oulu. Acta Univ. Oul. C 291. 120 p. Saatavissa: <http://urn.fi/urn:isbn:9789514287022>.

Lyöri, V. (2016). Tekniikan tohtori. Toimitusjohtaja. Dimense Oy. Oulu. Haastattelu 24.2.2016.

Micron Optics. (2016). Verkkosivu. [viitattu 10.4.2016]. Saatavissa: <http://www.micronoptics.com/>

Noptel Oy. (2016). PSM-R M2 Displacement sensor. Tuote-esite. [viitattu 14.4.2016]. Saatavissa: [http://www.noptel.fi/download/nms/brochures/Psmrm\\_210.pdf](http://www.noptel.fi/download/nms/brochures/Psmrm_210.pdf)

National Instruments. (2012). Making Accurate Strain Measurements. Verkkosivu. [viitattu: 6.5.2016]. Saatavissa: <http://www.ni.com/white-paper/6186/en/>

National Instruments. (2016). Measuring Position and Displacement with LVDTs. Verkkosivu. [viitattu: 6.5.2016]. Saatavissa: <http://www.ni.com/white-paper/3638/en/>

OSMOS Canada. (2016). Optical Extensometer. Technical data sheet. [viitattu: 10.4.2016]. Saatavissa: <http://www.osmos-canada.com/en/documents/Extenso.pdf>

SFS EN-1504-9. Betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineet ja niiden yhdistelmät. Määritelmät, vaatimukset, laadunvalvonta ja vaatimustenmukaisuuden arviointi. Osa 9: Suojaus- ja korjausaineiden ja niiden yhdistelmien periaatteet. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki. 2009. 29 s.

SFS-EN 1990 + A1 + AC. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. 2006. 84 s.

Siikanen, U. (2009). Rakennusaineoppi. Rakennustieto Oy. Kolofon Baltic OÜ. Viro. 7. painos. 328 s.

Tiehallinto. (2002). Siltojen korjaus. SILKO 1.233. Betonirakenteet. Halkeamien korjaaminen. Yleiset laatuvaatimukset. 05/03. [viitattu: 17.12.2015]. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/silko/kansio1/s1233.pdf>

Tiehallinto. (2003). Siltojen koekuormitukset vuosina 1994-2002. Luonnos 31.7.2003. Helsinki.

Tiehallinto. (2009a). Siltojen elinkaarikustannukset. Esiselvitys. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 28/2009, 30 s. ISSN 1459-1561, TIEH 4000703-v.

Tiehallinto. (2009b). Siltojen ylläpito. Toimintalinjat. Helsinki. [viitattu: 11.12.2015]. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/siltojenyllapito2009.pdf>

Tielaitos. (1992). Siltojen kantavuuden laskentaohje. Helsinki. ISBN 951-47-6859-0. [viitattu 11.12.2015]. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/silka100.pdf>

Tirkkonen, T. & Juntunen, J. (1995). Siltojen koekuormitukset vuosina 1983-1993. VTT. Espoo.

Toivola, P. (2016). Osastopäällikkö. Savcor Oy. Haastattelu 10.3.2016.

United Electronic Industries. (2013). The Twists of Strain Gauge Measurements - Part 1. Verkkosivu. [viitattu: 6.5.2016]. Saatavissa:

<https://ueidaq.wordpress.com/2013/08/02/the-twists-of-strain-gauge-measurements-part-1/>

VTT. (2008). Monitoring of Bridges (SIMO). Research report. Espoo.

VTT. (2013). SITUEL – Life Cycle and Safety in Bridges and Tunnels. Research report. Espoo.

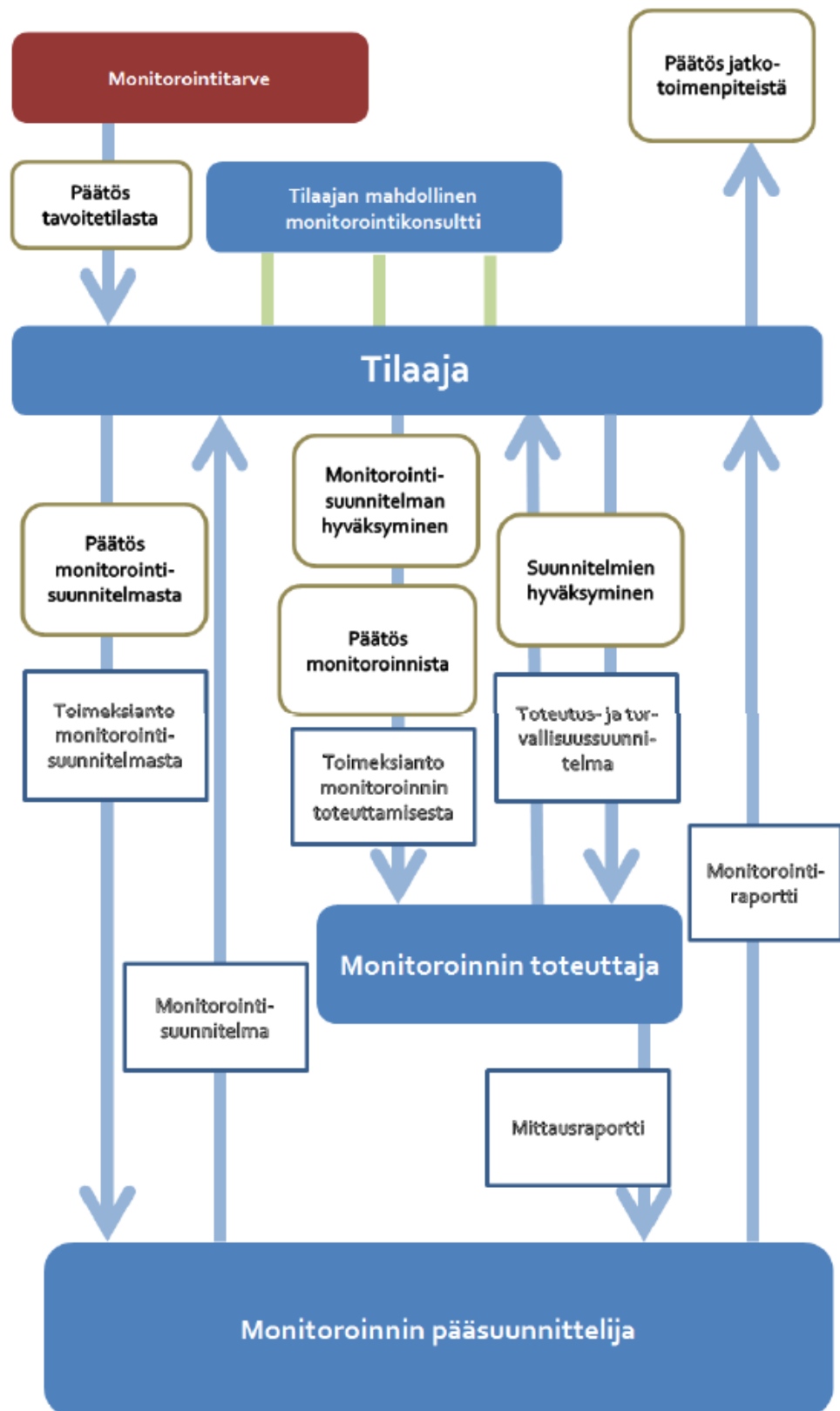
Vähäaho, J. (1989). RIL 179 Sillat. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Hanko. 392 s.

Webb, G. T., Vardanega, P. J. & Middleton, C. R. (2014). Categories of SHM Deployments: Technologies and Capabilities. J. Bridge Eng., 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000735, 04014118.

## LIITE A: TAVALLISIMMAT ANTURITYYPIT SILTOJEN MONITO- ROINNISSA (LIIKENNEVIRASTO 2016B)

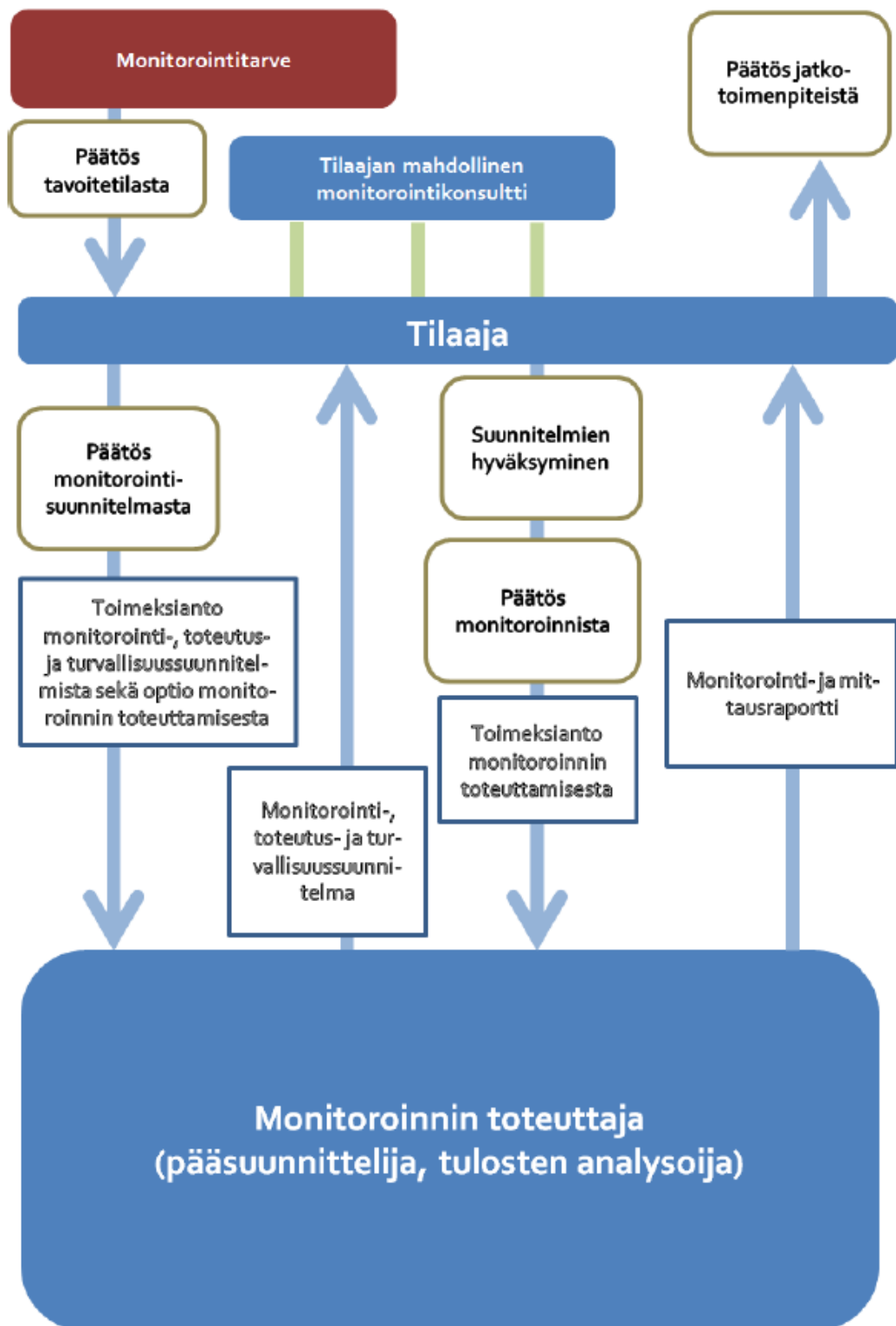
Mitattava suure	Sillan osa	Tavanomainen mittaussnopeus	Tavanomainen mittaustalue	Anturityyppi
Sillan taipuma	Pääpalkki	Hidas mittaus ~ 0.1 Hz	10 mm - 1 m 1 mm - 1 m ~20 mm	Teodoliitti Takymetri Laserskannaus (palkin geometria)
Sillan taipuma	Pääpalkki	0.1 – 1 kHz  0.1 -10 Hz	1 – 500 mm 1 – 500 mm 10 – 500 mm  0.5 – 100 mm	Laser taipuma-anturi Liikeanturi (maasilta) GPS+ maa-asema (pitkät riippusillat) Pyörivä laser
Sillan taipuma	Poikkipalkki Sekundääri Köysi	0 – 1 kHz  0.1 -10 Hz	1 – 500 mm 1 – 500 mm 0.5 – 100 mm 0.5 – 100 mm	Laser taipuma-anturi Liikeanturi Laser etäisyysanturi Pyörivä laser
Venymä (Teräs, betoni ja puu, jänni- tys)	Pääpalkki Poikkipalkki Sekundääri Betoniteräs	0 – 10 kHz 0 – 1 kHz	50 – 3000 µS 50 – 3000 µS 100 – 3000 µS	Venymäliuska Optinen kuitu Venymäanturi
Sillan värähtely	Jänne palkki kansi	0.1 - 100 Hz		Kiihtyvyyssanturi Venymäliuska (hitaita mittauksia myös liikeanturilla)
Voima	Osien väli- nen voima, tukivoima	0.1 – 1 kHz	1 kN – 1 MN	Voima-anturi (Venymäliuskat poikki- leikkauksen ympärillä)
Lämpötila	Kaikki sillan osat Ilma	n. 1/min	-100 +100 °C	Lämpötila-anturi Infrapunasensori/kamera
Säätötila	Sillan lähellä	n. 1/min		Säätöasema (ilman lämpö- tila, kosteus, säteily, sademäärä)
Liikenne	Sillan kansi	1 Hz ... 100 Hz	Määrä, akselit, nopeus Lisäksi painot Ajoneuvotyyppi Nopeus, määrä	Induktiosilmukka  BWIM mittaussysteemi Videokuva Laser detektori
Kosteus	Betoni teräksen pinta	n. 1/min	0 – 100%	Kosteusanturi
Särön kasvu teräksessä tai betonissa	Yleensä hitsisauma, liitos tai betoni	1 kHz		Akustinen emissio
Valmistusvirhe Väsymissärö	Teräspalkki Hitsisauma			Ultraäänianturi (yl. ma- nuaalinen)
Betoniterästen korroosio	Betoniteräs	1 Hz	Yl. kor- roosiovirta	Korroosioanturi

## LIITE B: YKSITYISKOHTAINEN PROSESSIKAAVIO VAIHEITTAISEN MONITOROINNIN TOTEUTTAMISESTA

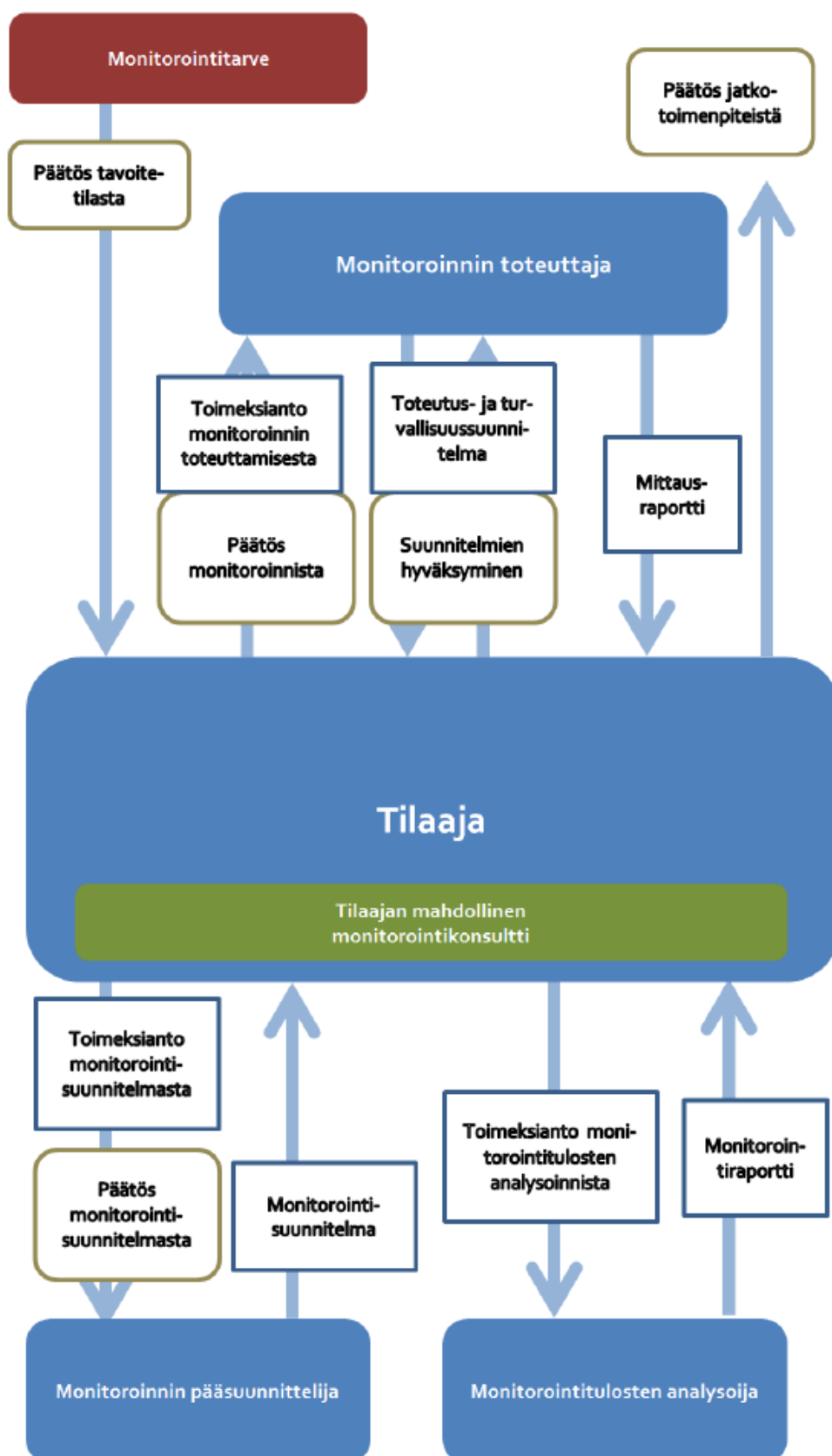




## LIITE C: YKSITYISKOHTAINEN PROSESSIKAAVIO KESKITE- TYN MONITOROINNIN TOTEUTTAMISESTA



## LIITE D: YKSITYISKOHTAINEN PROSESSIKAAVIO HAJAUTETUN MONITOROINNIN TOTEUTTAMISESTA



## **LIITE E: MONITOROINTI- JA TURVALLISUUSSUUNNITELMIEN SISÄLLÖT**

Monitoroinnin pääsuunnittelijan on tehtävä siltakohtainen monitorointisuunnitelma, missä esitetään

- kohteen yleiskuvaus
- monitorointiprojektin aikataulu
- monitoroinnin tavoitteet
- kaikki tarpeelliset toimenpiteet ja laitteet monitoroinnin suorittamiseksi
- lujuustekninen analyysi ja testi- tai koekuormituksen määrittely
- kriittisten mittauskohtien valinta
- antureiden ominaisuudet ja tarkkuustaso
- mittalaitteiden sijoitus
- asennustapa
- jatkuvan monitoroinnin enimmäiskatkoaika
- kaapeloinnin suunnittelu periaatteellisella tasolla
- tiedonsiirto periaatteellisella tasolla
- mitatun datan tallennuspaikka ja formaatti
- mittauksien käsittely, signaalinkäsittely
- analysoinnin ja raportoinnin määrittäminen

Työturvallisuuden takaamiseksi tarvittavia suunnitelmia on tehtävä

- työ- ja tukitelineistä
- putoamisvaarallisista töistä
- hukkumisvaaran sisältävistä töistä
- sähkötapaturmavaarallisista töistä
- sukellustöistä.
- nostotöistä
- liikennejärjestelyistä
- tie- ja katualueella sekä rautateillä tehtävistä töistä

## LIITE F: MONITOROINNIN TOTEUTUSSUUNNITELMAN SISÄLTÖ

Monitorointipalvelun toimittajan on tehtävä siltakohtainen monitoroinnin toteutussuunnitelma, missä on esitetty selkeästi toimitettava järjestelmä. Toteutussuunnitelmassa esitetään seuraavat pääkohdat:

- Järjestelmän yleiskuvaus
- anturityypit
- kaapelointi ja suojaputket
- antureiden suojakotelot
- laitekaappi
- käyttöjärjestelmät
- tiedon siirto ja tallennus
- mittalaitteet (yksityiskohtaisesti)
- anturityyppi ja mitattava suure
- anturin tarkka sijainti
- anturin mittausala, luotettavuus ja tarkkuus
- antureiden kiinnitys, kaapelointi ja suojaputket
- mittalaitteiden ja mittauskorttien tyyppi ja mittausohjelmisto
- järjestelmän asentaminen
- eri vaiheessa asennettavat osat
- antureiden ja suojakoteloiden kiinnitykset
- työnaikaiset kaapeloinnit sekä lopputilanteen kaapeloinnit
- suojaputkien kiinnitykset ja sijoitus
- liikennejärjestelyt ja liikenteenohjaus
- tiedotus (yhdessä tilaajan kanssa)
- testi- tai koekuormituksen toteutus
- asennuksen ja ylläpidon kuvaus
- antureiden ja mittalaitteiden kalibrointi
- antureiden ja mittalaitteiden vaihtaminen
- tietojen tallennuksen ja käsittelyn kuvaus
- tulosten ja raportoinnin kuvaus
- laatutason osoittaminen ja laadunvarmistuksen kuvaus
- mittaustulosten varmennus

## LIITE G: MITTAUS- JA MONITOROINTIRAPORTTIEN SISÄLLÖT

Monitorointipalvelun toimittajan on tehtävä mittauksista raportti, missä esitetään ainakin seuraavat pääkohdat:

- selostus käytetyistä antureista
- antureiden ja mittalaitteiden ominaisuudet ja kalibrointitiedot
- antureiden sijainnit
- testi- tai koekuormituksessa käytettyjen ajoneuvojen tarkat akselivälit ja akselimassat
- mittaustulokset suunnitelmassa vaaditussa muodossa (esim ASCII-muodossa)
- mittaajajankohda
- mittaustaajuus
- mittaava anturi ja mittalaite
- mitattava suure
- mittauksen tekijä
- selvitys käytetyistä kertoimista
- arvio mahdollisista epävarmuuksista

Monitoroinnista laaditaan kirjallinen raportti, johon liitetään valokuvat, videot, tutkimusraportit ja muut laaditut asiakirjat. Raportille ei aseteta tarkkoja muotovaatimuksia mutta siinä tulee esittää ainakin seuraavat asiat:

- tiivistelmä
- sillan yleiskuvaus
- monitoroinnin tavoite
- käytetyt tutkimusmenetelmät ja -välineet
- selostus tutkimustuloksista ja niiden merkityksestä rakenteiden kuntoon
- säilyvyyteen rakenneosittain
- mittaustulokset
- lujuustekninen analyysi (monitorointiraportti)
- tutkimustuloksiin liittyvät sallitut ja kriittiset arvot rakenteista saatujen tulosten vertailupohjaksi
- johtopäätökset rakenteiden kunnosta ja korjaustarpeesta rakenneosittain
- liikenneturvallisuutta ja kantavuutta vaarantavat tekijät
- arvio mittausten epävarmuudesta
- toimenpide-ehdotukset

## LIITE H: AJONEUVOT KOEKUORMITUKSISSA

**9-akselinen yhdistelmä:** THI-148 (1+1+3) + DCL-599 (2+2)

Kokonaispaino 39tn + 38 tn = 77 tn

Ääriakselien etäisyys 19,15 m



**8-akselinen yhdistelmä:** LMB-770 (1+3) + DBN-705 (2+2)

Kokonaispaino 35 tn + 35 tn = 70 tn

Ääriakselien etäisyys 18,5 m



**HCT:** BRK-503 (1+2) + DBC-421 (3) + DED-683 (2+3)

Kokonaispaino n. 85 tn

Ääriakselien etäisyys 27,55 m

Akselivälit [cm]: 320 + 137 + 538 + 136 + 136 + 547 + 131 + 538 + 136 + 136



**Lavetti:** (1+3) + (8)

Omapaino 44t

1. kuormaus 96t, kokonaispaino 140t
2. kuormaus 112t, kokonaispaino 156t
3. kuormaus 128t, kokonaispaino 172t



# **LIITE I: KOE KUORMITUKSEN A MITTAUSTULOKSET (EI AN- TURIVERTAILUSSA)**

Koekuormitusvaihe													
	A1	A2	A3	A4	A5	A6		A1	A2	A3	A4	A5	A6
Venymä [μɛ]								Jännitys [Mpa]					
max													
oSgS 9	9	3	14	15	13	19		2.0	0.7	2.9	3.2	2.7	4.0
oSgS 11	14	3	16	15	11	16		2.8	0.6	3.4	3.2	2.2	3.4
oSgS 15	103	31	99	83	119	81		21.7	6.6	20.8	17.5	25.1	17.0
Laser 18	5	4	6	3	5	4		1.1	0.7	1.2	0.6	1.1	0.7
min													
oSgS 9	-27	-63	-34	-22	-76	-20		-5.7	-13.2	-7.2	-4.7	-15.9	-4.1
oSgS 11	-68	-28	-103	-68	-85	-57		-14.2	-5.9	-21.6	-14.3	-17.8	-12.0
oSgS 15	-41	-31	-68	-50	-70	-48		-8.6	-6.6	-14.4	-10.5	-14.7	-10.1
Laser 18	-6	-3	-6	-5	-9	-4		-	-	-	-	-	-
p2p													
oSgS 9	36	66	48	37	88	39		7.7	13.9	10.1	7.9	18.6	8.1
oSgS 11	81	30	119	83	95	73		17.0	6.4	25.0	17.5	20.0	15.4
oSgS 15	144	63	167	134	189	129		30.2	13.2	35.1	28.1	39.8	27.1
Laser 18	11	6	12	8	14	8		-	-	-	-	-	-



## LIITE J: KOEKUORMITUKSEN B MITTAUSTULOKSET (EI AN-TURIVERTAILUSSA)

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
<b>Venymä [μɛ]</b>															
<b>max</b>															
oSgI 1	100	147	154	160	134	168	135	288	190	281	140	193	202	317	260
oSgI 10	50	58	66	5	46	56	64	65	59	50	64	57	62	49	55
oSgI 14	304	271	287	384	266	445	545	538	329	241	373	327	354	243	294
<b>min</b>															
oSgI 1	63	54	48	60	61	52	60	36	54	46	59	51	50	40	44
oSgI 10	-48	-51	-61	-98	-29	-71	-92	-95	-80	-22	-111	-77	-99	-28	-65
oSgI 14	131	125	122	100	143	231	316	269	88	110	76	89	76	103	38
<b>p2p</b>															
oSgI 1	37	93	106	100	73	116	75	252	136	235	81	142	152	277	216
oSgI 10	98	109	127	103	75	127	156	160	139	72	175	134	161	77	120
oSgI 14	173	146	165	284	123	214	229	269	241	131	297	238	278	140	256

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
<b>Jännitys [MPa]</b>															
<b>max</b>															
oSgI 1	21.0	30.9	32.3	33.6	28.1	35.3	28.4	60.5	39.9	59.0	29.4	40.5	42.4	66.6	54.6
oSgI 10	10.5	12.2	13.9	1.1	9.7	11.8	13.4	13.7	12.4	10.5	13.4	12.0	13.0	10.3	11.6
oSgI 14	63.8	56.9	60.3	80.6	55.9	93.5	114.5	113.0	69.1	50.6	78.3	68.7	74.3	51.0	61.7
<b>min</b>															
oSgI 1	13.2	11.3	10.1	12.6	12.8	10.9	12.6	7.6	11.3	9.7	12.4	10.7	10.5	8.4	9.2
oSgI 10	-10.1	-10.7	-12.8	-20.6	-6.1	-14.9	-19.3	-20.0	-16.8	-4.6	-23.3	-16.2	-20.8	-5.9	-13.7
oSgI 14	27.5	26.3	25.6	21.0	30.0	48.5	66.4	56.5	18.5	23.1	16.0	18.7	16.0	21.6	8.0
<b>p2p</b>															
oSgI 1	7.8	19.5	22.3	21.0	15.3	24.4	15.8	52.9	28.6	49.4	17.0	29.8	31.9	58.2	45.4
oSgI 10	20.6	22.9	26.7	21.6	15.8	26.7	32.8	33.6	29.2	15.1	36.8	28.1	33.8	16.2	25.2
oSgI 14	36.3	30.7	34.7	59.6	25.8	44.9	48.1	56.5	50.6	27.5	62.4	50.0	58.4	29.4	53.8



## SISÄLLYSLUETTELO

1. KOHTEEN YLEISKUVAUS.....	1
2. MONITOROINTIPROJEKTIN AIKATAULU .....	1
3. MONITOROINNIN TAVOITTEET .....	1
4. KAIKKI TARPEELLISET TOIMENPITEET JA LAITTEET MONITOROINNIN SUORITTAMISEKSI.....	2
5. LUJUUSTEKNINEN ANALYYSI JA TESTI- TAI KOE KUORMITUKSEN MÄÄRITTELY.....	2
6. KRIITTISTEN MITTAUSKOHTIEN VALINTA.....	2
7. ANTUREIDEN OMINAISUUDET JA TARKKUUSTASO.....	16
8. JÄRJESTELMÄKUVAUS.....	17
9. MITTALAITTEIDEN SJOITUS.....	17
10. ANTUREIDEN ASENNUSTAPA.....	18
11. JATKUVAN MONITOROINNIN ENIMMÄISKATKOAIKA .....	21
12. KAAPELOINNIN SUUNNITTELU PERIAATTEELLISELLA TASOLLA.....	22
13. MITATUN DATAN TALLENNUS, FORMAATTI JA TIEDONSIIRTO .....	22
14. ANALYSOINNIN JA RAPORTOINNIN MÄÄRITTÄMINEN.....	22

LIITTEET: MITTALAITTEIDEN JA ANTUREIDEN TEKNISET TIEDOT

LIITE 1: OSMOS-MONITOROINTIKESKUS JA V5-ANTURI

LIITE 2: OSMOS V2-ANTURI

LIITE 3: DMM-TASOMITTAUSLAITE

LIITE 4: SPECTRA PRECISION LL300S TASOLASER

LIITE 5: MICRON OPTICS MITTALAITE SM125

LIITE 6: MICRON OPTICS OS3610-ANTURI

LIITE 7: MICRON OPTICS OS3100-ANTURI

LIITE 8: MICRON OPTICS OS4300-ANTURI

LIITE 9: LIPS P103 LINEAARIANTURI

## 1. Kohteen yleiskuvaus

Keltin silta on Kymijoen ylittävä silta. Se sijaitsee Keltin voimalaitoksen kohdalla tiellä 6 noin 5 km Kouvolan keskustasta. Silta on neliaukkoinen teräsbetonikantinen ja 2-palkkinen teräspalkkisilta. Sillan kansi on niin sanottu laiska kansi, joten se liikkuu vapaasti palkkien päällä. Sen jännemitat ovat 35 m + 60 m + 60 m + 35 m kokonaispituuden ollessa 203,6 m. Sillan hyödyllinen leveys on 12,5 m. Silta on valmistunut vuonna 1972. Sillan keskimääräinen vuorokausiliikenne (KVL) vuonna 2015 oli 12 144 ajoneuvoa, josta 12 % oli raskaita ajoneuvoja.

Sillan kunnon, toiminnan ja kantavuuden arvioimiseksi VTT on tehnyt sillalle koekuormituksen syksyllä 2008. Koekuormituksen perusteella on arvioitu sillan toimintaa ja väsytykestävyyttä sekä kestävyyttä raskaille ajoneuvoille ja erikoiskuormille. Koekuormituksen jälkeen siltaa on monitoroitu venymäliuskoilla VTT:n toimesta.

Vuoden 2010 lopulla sillan välitukien laakerit tuilla 2 ja 4 on vaihdettu kumipesälaakereiksi. Sillalle on suoritettu yleistarkastus kesäkuussa 2011.

## 2. Monitorointiprojektin aikataulu

Mittauslaitteiston asennukset suoritetaan alkuvuodesta viikolla 16. Koekuormitus suunnitellaan suoritettavaksi torstai-iltana 21.4.2016 klo 18 alkaen (punnitukset klo 17 alkaen). Monitorointia jatketaan koekuormituksen jälkeen 2 viikkoa. Mittaustulosten perusteella tehdään päätös mahdollisesta jatkuvasta monitoroinnista.

*Taulukko 1. Monitorointiprojektin alustava aikataulu. Vuosi 2016 viikot 14 – 23.*

	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Toteutussuunnitelma	XXXXX	XXXXX								
Asennukset			XXX							
Koekuormitus			==X							
Monitorointi			X	XXXXX	XXXXX					
Monitoroinnin jatko						?????	?????	?????	?????	?????
Tulosten arviointi				XXXXX	XXXXX	XXXXX				

## 3. Monitoroinnin tavoitteet

Monitoroinnin tavoitteena on tuottaa mittaustietoa sillan rakenteen toiminnasta sekä vertailevaa mittaustietoa eri antureiden välillä samasta paikasta mitattuna. Lisäksi mittaustuloksia on mahdollisuus vertailla VTT:n suorittamiin mittauksiin, jolloin voidaan päätellä onko sillan kunto heikentynyt monitorointien välillä.

Teräspalkkien liitoksissa on merkkejä väsymisestä (säröjä), joten sillan kantavuus ei ole halutulla tasolla. Erikoiskuljetuksia on jouduttu reitittämään uudelleen kantavuusongelmien vuoksi. Koekuormituksella saadaan tämän hetkinen tieto sillan kantavuudesta.

Silta on pian käyttöikänsä lopussa ja on suunniteltu uusittavaksi tietyllä aikataululla (10 vuotta). Jatkuvalla monitoroinnilla silta voitaisiin käyttää loppuun hallitusti ja turvallisesti.

#### 4. Kaikki tarpeelliset toimenpiteet ja laitteet monitoroinnin suorittamiseksi

Monitorointi aloitetaan kertamonitorointina, jonka tulosten perusteella päätetään jatkuvasta monitoroinnista. Sekä kerta että jatkuva monitorointi suoritetaan laajuudeltaan suppeana monitorointina. Jatkuvaan monitorointiin anturimäärää karsitaan.

#### 5. Lujuustekninen analyysi ja testi- tai koekuormituksen määrittely

Koekuormitus on suunniteltu suoritettavaksi seuraavilla ajoneuvoyhdistelmillä:

- 8-akselinen (1+3) + (2+2), 70t
- 9-akselinen (1+1+3) + (2+2), 77t
- HCT- rekka (1+2) + (3) + (2+3), 85t
- Lavetti (1+3) + (8), 140t – 172t

Koekuormituksessa käytettävät ajolinjat ovat kaistan keskellä ja reunassa (kaistaviivojen sisällä). Kuormitusajoneuvojen ajosuunta on lännestä itään. Tarkempi kuvaus koekuormituksesta esitetään koekuormitus suunnitelmassa.

Lujuustekninen analyysi ei sisälly monitoroinnin toimittamiseen. Monitoroinnin tilaaja huolehtii lujuuslaskentojen teettämisestä haluamallaan palveluntarjoajalla.

#### 6. Kriittisten mittauskohtien valinta

Mittauskohdiksi valikoitiin rakenteesta samoja kohtia, joita VTT on käyttänyt omassa monitoroinnissaan. Venymäantureiden ja taipumamittalaitteiden päämittauskohdat ovat keskiaukon (SP3), välituen (T4) ja reuna-aukon (SP4) teräspalkeissa (MG), joissa taivutusmomentti on suurimmillaan. Lisäksi mitataan betonikannen ja teräspalkin välistä liikettä sekä betonikannen poikkiraudoituksen ja betonipinnan venymää. Osa mittauskohdista varustetaan kaksoisanturoinnilla vertailevan mittaustiedon tuottamiseksi.

Taulukossa 2 on listattu sillan mittauskohdat, anturit ja mittaussuureet. Anturit on nimetty lyhenteellä anturityypin mukaan sekä juoksevilla numerolla seuraavasti:

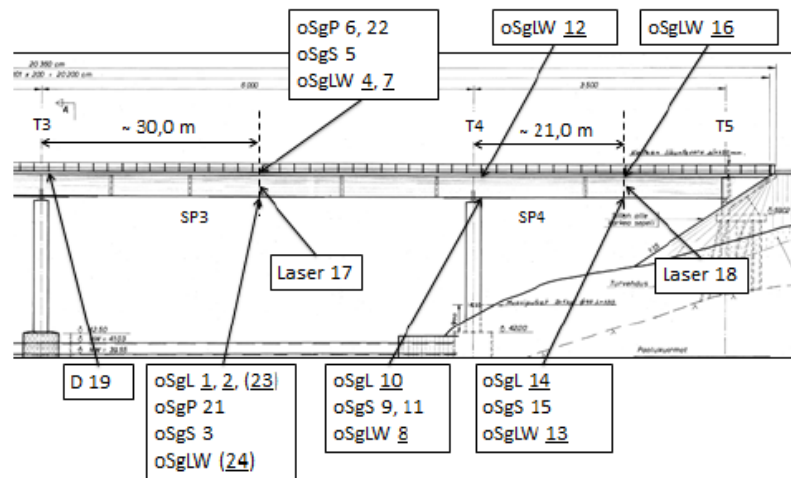
- oSgL      optical Strain gauge Long (pitkä kuitu)
- oSgP      optical Strain gauge Pipe (pitkä kuitu putkessa)
- oSgS      optical Strain gauge Short (pisteanturi)
- oSgLW    optical Strain gauge Long Wireless
- D          Displacement (siirtymäanturi)
- Laser     taipuma-anturi (DMM)

Kuvissa 1 – 7 on havainnollistettu antureiden sijainnit. Kuviin on alleviivattu anturit, jotka jätetään jatkuvaan mittaukseen koekuormituksen jälkeen. Kuvissa sulkeissa olevat anturit asennetaan koekuormituksen jälkeen. Taulukoissa 3 – 26 on esitetty antureiden tarkka sijainti rakenteessa monitorointikäsi­kirjan mukaisilla englanninkielisillä lyhen­teillä mittauskohdan systemaattista käsittelyä varten.

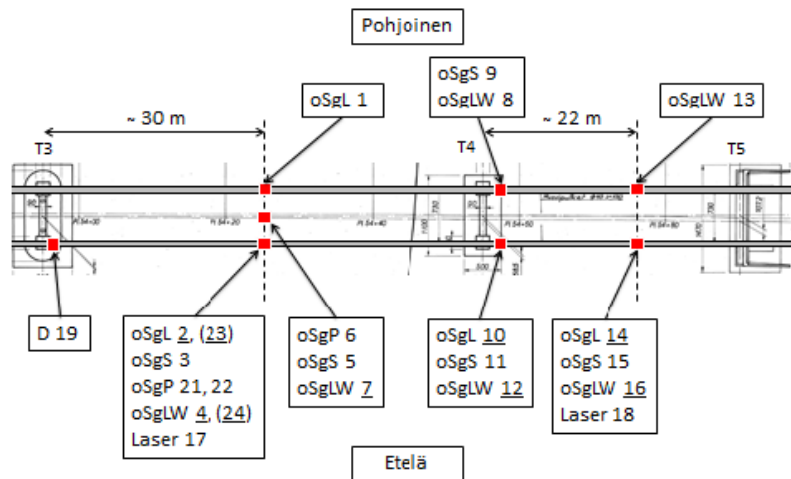
Jatkuvassa monitoroinnissa seurataan venymiä eteläisen palkin alalaipasta (3 kpl) sekä yhdestä pohjoisesta alalaipasta (1 kpl). Tämä on huomioitava antureita valittaessa.

Taulukko 2. Antureiden asennuskohdat ja mitattavat suuret.

Anturin n:o	Sillan nimi ja numero	Tarkasteltava jänneväli	Jänneväliällä oleva rakenneos	Rakenneosan aliosa	Anturin paikka rakenneosassa (koordinaatisto)	Mitattava suure
oSgL 1	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Pohjoinen teräspalkki	Alalaippa	30 m välituelta	Venymä (jatkuva)
oSgL 2	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Eteläinen teräspalkki	Alalaippa	30 m välituelta	Venymä (jatkuva)
oSgS 3	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Eteläinen teräspalkki	Alalaippa	30 m välituelta	Venymä Dimense
oSgLW 4	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Eteläinen teräspalkki	Ylälaippa	30 m välituelta	Venymä
oSgS 5	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Betonikansi	Poikittainen betoniteräs	30 m välituelta, keskellä kantta	Venymä Dimense
oSgP 6	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Betonikansi	Betonin pinta poikkisuunnassa	30 m välituelta, keskellä kantta	Venymä Dimense
oSgLW 7	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Betonikansi	Betonin pinta poikkisuunnassa	30 m välituelta, keskellä kantta	Venymä
oSgLW 8	Keltin silta KaS-766	Välituki T4	Pohjoinen teräspalkki	Alalaippa		Venymä
oSgS 9	Keltin silta KaS-766	Välituki T4	Pohjoinen teräspalkki	Alalaippa		Venymä Dimense
oSgL 10	Keltin silta KaS-766	Välituki T4	Eteläinen teräspalkki	Alalaippa		Venymä (jatkuva)
oSgS 11	Keltin silta KaS-766	Välituki T4	Eteläinen teräspalkki	Alalaippa		Venymä Dimense
oSgLW 12	Keltin silta KaS-766	Välituki T4	Eteläinen teräspalkki	Ylälaippa		Venymä
oSgLW 13	Keltin silta KaS-766	Aukko 4	Pohjoinen teräspalkki	Alalaippa	14 m maatuen laakerilinjasta	Venymä
oSgL 14	Keltin silta KaS-766	Aukko 4	Eteläinen teräspalkki	Alalaippa	14 m maatuen laakerilinjasta	Venymä (jatkuva)
oSgS 15	Keltin silta KaS-766	Aukko 4	Eteläinen teräspalkki	Alalaippa	14 m maatuen laakerilinjasta	Venymä Dimense
oSgLW 16	Keltin silta KaS-766	Aukko 4	Eteläinen teräspalkki	Ylälaippa	14 m maatuen laakerilinjasta	Venymä
Laser 17	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Eteläinen teräspalkki	Uuma	Aukon keskikohta 30 m välituelta	Taipuma Dimense
Laser 18	Keltin silta KaS-766	Aukko 4	Eteläinen teräspalkki	Uuma	14 m maatuen laakerilinjasta	Taipuma Dimense
D 19	Keltin silta KaS-766	Välituki T4	Eteläinen teräspalkki	Ylälaippa/ betonikansi		Siirtymä Dimense
D 20	Keltin silta KaS-766	Maatuki T5	Eteläinen teräspalkki	Ylälaippa/ betonikansi		Siirtymä Dimense
oSgP 21	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Eteläinen teräspalkki	Alalaippa	30 m välituelta	Venymä Dimense
oSgP 22	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Eteläinen teräspalkki	Ylälaippa	30 m välituelta	Venymä Dimense
oSgL 23	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Eteläinen teräspalkki	Alalaippa	30 m välituelta	Venymä
oSgLW 24	Keltin silta KaS-766	Aukko 3	Eteläinen teräspalkki	Alalaippa	30 m välituelta	Venymä

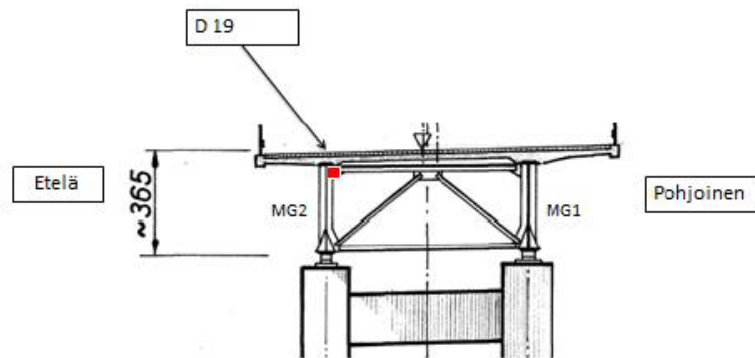


Kuva 1. Anturoimmit sivuleikkauskuvassa (tuet T3 – T5).

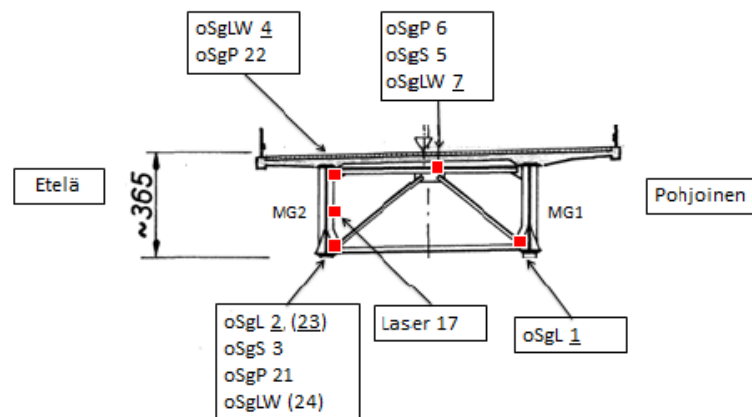


Kuva 2. Anturointi tasokuvassa (tuet T3 – T5).

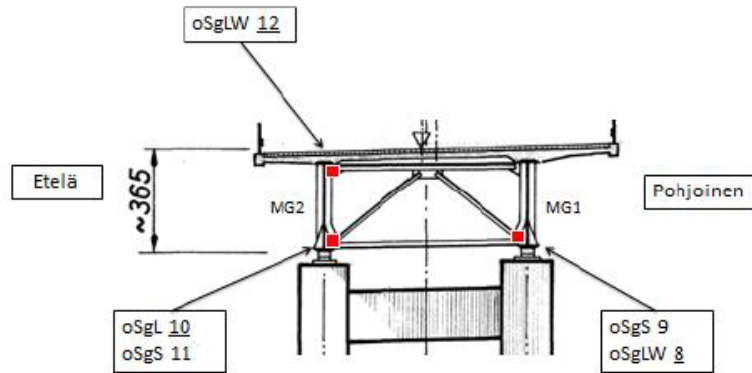




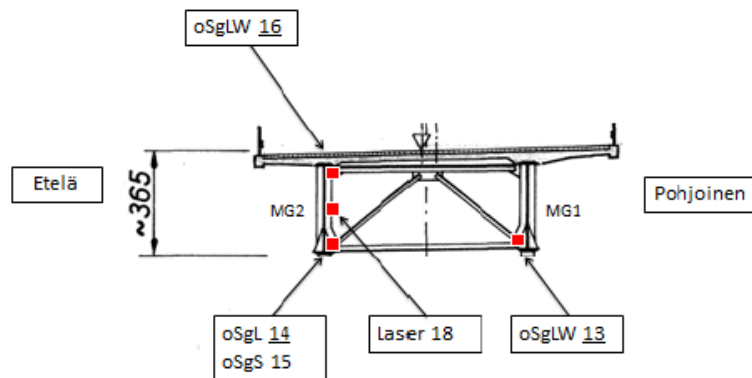
Kuva 3. Anturointi välituella T3.



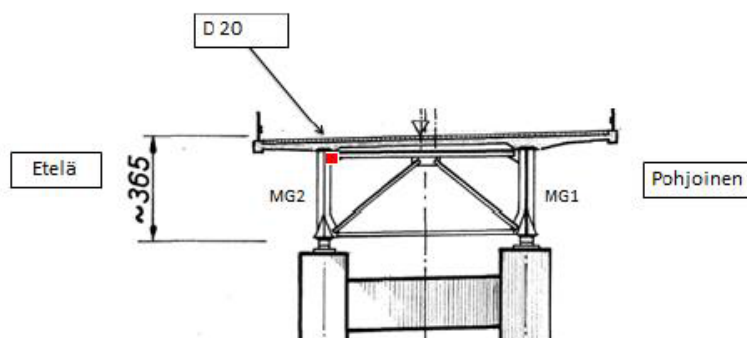
Kuva 4. Anturointi keskiaukon poikkileikkauksessa (SP3).



Kuva 5. Anturointi välituella T4.



Kuva 6. Anturointi reuna-aukossa (SP4).



Kuva 7. Anturointi maatuella T5.

Taulukko 3. Anturin oSg1 1 asennuskohta sillassa (Esimerkki aukko 3, pohjoinen teräspalkki MG1, alalaippa LF, x = anturin toisen pään etäisyys välituella T3).

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP3	MG1
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupään- koordinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 29635 mm y = 120 mm (uunasta) z = 30 mm	LG 2000 mm DP = 10 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG1/LF/TS29635,120,30/LG2000/DP0,0,10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 1, Lower Flange, Top Surface x = 29635, y = 120 mm, z = 30 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = 10)			

Taulukko 4. Anturin oSg1 2 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP3	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 29635 mm y = -115 mm (uunasta) z = 30 mm	LG 2000 mm DP = 10 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG2/LF/TS29635,-115,30/LG2000/DP0,0,10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 2, Lower Flange, Top Surface x = 29635, y = -115 mm, z = 30 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = 10)			

Taulukko 5. Anturin oSgS 3 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP3	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 30495 mm y = -175 mm (uunasta) z = 30 mm	LG 22 mm DP = 0 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG2/LF1/TS30495,-175,30/LG22/DP0,0,0</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 2, Lower Flange, Top Surface x = 30495, y = -175 mm, z = 30 mm, LG 22 mm, DP x = 0, y = 0, z = 0)			

Taulukko 6. Anturin oSgS 4 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP3	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
UF	BS	x = 29635 mm y = -120 mm (uunasta) z = -30 mm	LG 2000 mm DP = -10 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG2/UF1/TS29635,-120,-30/LG2000/DP0,0,-10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 2, Upper Flange, Top Surface x = 29635, y = -120 mm, z = -30 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = -10)			

Taulukko 7. Anturin oSgS 5 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa
Keltin silta	KaS-766	SP3	BD
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LR	BS	x = 28720 mm y = 3636 mm (uunasta MG1) z = 35 mm	LG 22 mm DP = 0
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/BD/LR/BS28720,3636,35/LG22/DP0,0,0</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Bridge Deck, Lower Rebar, Bottom Surface x = 28720, y = 3636 mm, z = 35 mm, LG 22 mm, DP x = 0, y = 0, z = 0)			

Taulukko 8. Anturin oSgP 6 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa
Keltin silta	KaS-766	SP3	BD
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
-	BS	x = 29160 mm y = 3540 mm (uunasta MG1) z = 0 mm	LG 254 mm DP = -22 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/BD/-BS29160,3540,0/LG254/DP0,0,-22</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Bridge Deck, -, Bottom Surface x = 29160, y = 3540 mm, z = 0 mm, LG 254 mm, DP x = 0, y = 0, z = -22)			

Taulukko 9. Anturin oSgLW 7 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa
Keltin silta	KaS-766	SP3	BD
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupään- koordinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
-	BS	x = 28950 mm y = 2685 mm z = 0 mm	LG 2000 mm DP = -10 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/BD/-BS28950,2685,0/LG2000/DP0,0,-10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Bridge Deck, -, Bottom Surface x = 28950, y = 2685 mm, z = 0 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = -10)			

Taulukko 10. Anturin oSgLW 8 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG1
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupään- koordinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 835 mm y = 115 mm (uunasta) z = 30 mm	LG 2000 mm DP = 10 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP4/MG1/LF/TS835,115,30/LG2000/DP0,0,10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 4, Main Girder 1, Lower flange, Top Surface x = 835, y = 115 mm, z = 30 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = 10)			

Taulukko 11. Anturin oSgS 9 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG1
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupään- koordinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 1633 mm y = 157 mm (uumasta) z = 30 mm	LG 22 mm DP = 0
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP4/MG1/LF/TS1633,157,30/LG22/DP0,0,0</b> (Bridge KaS-766, Spacing 4, Main Girder 1, Lower flange, Top Surface x = 1633, y = 157 mm, z = 30 mm, LG 22 mm, DP x = 0, y = 0, z = 0)			

Taulukko 12. Anturin oSgI 10 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 835 mm y = -120 mm (uumasta) z = 30 mm	LG 2000 mm DP = 10 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP4/MG2/LF/TS835,-120,30/LG2000/DP0,0,10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 2, Lower Flange, Top Surface x = 835, y = -120 mm, z = 30 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = 10)			

Taulukko 13. Anturin oSgS 11 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 1780 mm y = -210 mm (uumasta) z = 30 mm	LG 22 mm DP = 0
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP4/MG2/LF/TS1780,-210,30/LG22/DP0,0,0</b> (Bridge KaS-766, Spacing 4, Main Girder 2, Lower flange, Top Surface x = 1780, y = -210 mm, z = 30 mm, LG 22 mm, DP x = 0, y = 0, z = 0)			

Taulukko 14. Anturin oSgLW 12 asennuskohta sillassa välimellä.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
UF	BS	x = 835 mm y = -110 mm (uunasta) z = -30 mm	LG 2000 mm DP = -10 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP4/MG2/UF/BS835,-110,-30/LG2000/DP0,0,-10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 4, Main Girder 2, Lower Flange, Top Surface x = 835, y = -110 mm, z = -30 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = -10)			

Taulukko 15. Anturin oSgLW 13 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG1
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupään- koordinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 21655 mm y = 125 mm (uunasta) z = 30 mm	LG 2000 mm DP = 10 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP4/MG1/LF/TS21655,125,30/LG2000/DP0,0,10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 4, Main Girder 1, Lower flange, Top Surface x = 21655, y = 125 mm, z = 30 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = 10)			

Taulukko 16. Anturin oSgL 14 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 21655 mm y = -120 mm (uunasta) z = 30 mm	LG 2000 mm DP = 10 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP4/MG2/LF/TS21655,-120,30/LG2000/DP0,0,10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 4, Main Girder 2, Lower flange, Top Surface x = 21655, y = -120 mm, z = 30 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = 10)			

Taulukko 17. Anturin oSgS 15 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 22575 mm y = -225 mm (uunasta) z = 30 mm	LG 22 mm DP = 0
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP4/MG2/LF/TS22575,-225,30/LG22/DP0,0,0</b> (Bridge KaS-766, Spacing 4, Main Girder 2, Lower flange, Top Surface x = 22575, y = -225 mm, z = 30 mm, LG 22 mm, DP x = 0, y = 0, z = 0)			

Taulukko 18. Anturin oSgLW 16 asennuskohta sillassa (Esimerkki reuna-aukko 2, eteläinen teräspalkki, ylälaippa, x = anturin toisen pään etäisyys välituelta T4).

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
UF	BS	x = 21655 mm y = -125 mm (uunasta) z = -30 mm	LG 2000 mm DP = -10 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP4/MG2/UF/BS21655,-125,-30/LG2000/DP0,0,-10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 4, Main Girder 2, Upper Flange, Bottom Surface x = 21655, y = -125 mm, z = -30 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = -10)			

Taulukko 19. Anturin Laser 17 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP3	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
WB	LW	x = 29360 mm y = 0 z = -940 mm (ylälaipasta)	LG 160 mm DP = -75 mm (y)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG2/WB/LW29360,0,-940/LG160/DP0,-75,0</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 2, Web, Left Web x = 29360, y = 0 mm, z = -940 mm, LG 160 mm, DP x = 0, y = -75, z = 0)			



Taulukko 20. Anturin Laser 18 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
WB	LW	x = 22946 mm y = 0 mm z = -720 mm (ylälaipasta)	LG 160 mm DP = -80 mm (y)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP4/MG2/WB/LW22946,0,-720/LG160/DP0,-80,0</b> (Bridge KaS-766, Spacing 4, Main Girder 2, Web, Left Web x = 22946, y = 0 mm, z = -720 mm, LG 160 mm, DP x = 0, y = -80, z = 0)			

Taulukko 21. Anturin D 19 asennuskohta sillassa

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP3	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
UF	BS	x = 715 mm y = -500 mm (uunasta) z = 0 mm	LG 250 mm DP = -20 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG2/UF/BS715,-500,0/LG250/DP0,0,-20</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 2, Upper flange, Bottom Surface x = 715, y = -500 mm, z = 0 mm, LG 250 mm, DP x = 0, y = 0, z = -20)			

Taulukko 22. Anturin D 20 asennuskohta sillassa. Ei asennettu.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP4	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
UF	BS	x = - y = - z = -	
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG2/UF/TS?,?,?/LG250/DP0,0,0</b> (Bridge KaS-766, Spacing 4, Main Girder 2, Lower flange 1, Top Surface x = ?, y = ? mm, z = ? mm, LG 250 mm, DP x = 0, y = 0, z = 0)			

Taulukko 23. Anturin oSgP 21 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP3	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF1	TS	x = 30385 mm y = -205 mm (uunasta) z = 30 mm	LG 254 mm DP = 31 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG2/LF/TS30385,-205,30/LG254/DP0,0,31</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 2, Lower Flange, Top Surface x = 30385, y = -205 mm, z = 30 mm, LG 254 mm, DP x = 0, y = 0, z = 31)			

Taulukko 24. Anturin oSgP 22 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP3	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
UF	BS	x = 30385 mm y = -205 mm (uunasta) z = -30 mm	LG 254 mm DP = -31 mm (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG2/UF/BS30385,-205,-30/LG254/DP0,0,-31</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 2, Upper Flange, Top Surface x = 30385, y = -205 mm, z = -30 mm, LG 254 mm, DP x = 0, y = 0, z = -31)			

Taulukko 25. Anturin oSgL 23 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP3	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 30135 mm y = -310 mm (uunasta) z = 30 mm	LG 1000 mm DP = 10 (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG2/LF/TS30135,-310,30/LG1000/DP0,0,10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 2, Lower Flange, Top Surface x = 30135, y = -310 mm, z = 30 mm, LG 1000 mm, DP x = 0, y = 0, z = 10)			

Taulukko 26. Anturin oSgLW 24 asennuskohta sillassa.

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 2)
Keltin silta	KaS-766	SP3	MG2
Sillan aliosa	Aliosan pinnan tunnus	Anturin alkupäänkoor- dinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF	TS	x = 29615 mm y = -225 mm (uumasta) z = 30 mm	LG 2000 mm DP = 10 (z)
Lyhennetty merkintä: <b>BRKaS-766/SP3/MG2/LF/TS29615,-225,30/LG2000/DP0,0,10</b> (Bridge KaS-766, Spacing 3, Main Girder 2, Lower Flange, Top Surface x = 29615, y = -225 mm, z = 30 mm, LG 2000 mm, DP x = 0, y = 0, z = 10)			

## 7. Antureiden ominaisuudet ja tarkkuustaso

Antureiden tarkat tekniset tiedot on esitetty liitteissä. Alla on listattu antureiden oleellisia ominaisuuksia.

### OSMOS V5-valokuituanturi (oSgL)

- Mittaustaajuus: 50 Hz (dynaaminen 100 Hz)
- Mittausalue: 4 mm (anturin pituus 2 m)
- Erottelukyky: 1 µm anturin pituudelta
- Tarkkuus: ± 2 µm

### OSMOS LIRIS V2-valokuituanturi (oSgLW)

- Mittaustaajuus: 50 Hz
- Mittausalue: 4 mm (anturin pituus 2 m)
- Erottelukyky: 20 µm

### Pistevenymäanturit Micron Optics os3110/os3120 (oSgS)

- Herkkyys: ~ 1,4 pm/µε
- Mittaustaajuus: 2 Hz (lukulaite rajoittaa)
- Mittausalue: ± 2500 µε (anturin pituus 22 mm)

**Putkivenymäanturi Micron Optics os3610 (oSgP)**

- Herkkyys:  $\sim 1,2 \text{ pm}/\mu\text{ε}$
- Mittaustaajuus: 2 Hz (lukulaite rajoittaa)
- Mittausalue: 5000  $\mu\text{ε}$  (anturin pituus 254 mm)

**DMM-taipuma-anturi (Laser)**

- Mittaustaajuus: 10 Hz
- Mittausalue: 0 – 160 mm
- Erottelukyky: 0,5 mm (kertamittaus, paranee keskiarvostuksella)

**Siirtymäanturi LIPS P103 (D)**

- Mittaustaajuus:  $> 300 \text{ Hz}$
- Mittausalue: 250 mm
- Erottelukyky:  $\sim 10 \mu\text{m}$

**8. Järjestelmäkuvaus****Inspecta Oy**

OSMOS-valokuituanturien mittausjärjestelmänä toimii OSMOS-järjestelmätoimittajan oma laitteisto ohjelmistoineen. Sillalle asennettava mittalaite sisältää SPCU-yksikön ja DAU-yksikön. SPCU-yksikkö toimii järjestelmän tiedonkäsittely-yksikkönä. DAU-yksikkö muodostaa valokuituanturista tulevan valosignaalin ymmärrettäväksi mittaus-tiedoksi. Mittaustiedot ladataan reaaliaikaisesti järjestelmätoimittajan pilvipalveluun. V5-valokuituantureiden mittaustiedot on seurattavissa web-selaimen välityksellä yhdellä näytöllä. Langattomille V2-valokuituantureille tarvitaan tietokoneelle erillinen ohjelmisto, jonka avulla voidaan seurata yksittäisen anturin mittaustietoja.

**Dimense Oy**

Kaksi rinnakkaista mittausjärjestelmää, joissa molemmissa on oma ohjelmisto. Kolmas ohjelmisto, joka toimii web-selaimessa, yhdistää nämä kaksi muuta ohjelmistoa. Toisessa mittausjärjestelmässä on Micron Opticsin SM125-500 lukulaite ja Enlight ohjelmisto. Toinen on Dimense Oy:n kehittämä DMM -tasomittausjärjestelmä.

**9. Mittalaitteiden sijoitus**

Mittauskeskukset asennetaan aikaisemmassa monitoroinnissa rakennetulle tasolle, joka sijaitsee keskiaukon keskellä (Kuva 8).



*Kuva 8. Mittausyksiköiden asennuspaikka keskellä keskiaukkoa.*

## 10. Antureiden asennustapa

Inspectan OSMOS-valokuituanturit ja Dimensen pistevenymäanturit (Kuva 9) kiinnitetään korkealujuusteräkseen (teräspalkit) liimaamalla. Vaihtoehtoisesti pistevenymäanturit voidaan myös kiinnittää pistehitsaamalla. Pistehitsausta suositetaan, jos ilman on liian kylmä liimaamiselle. Ennen asennusta teräksen maalipinnoite hiotaan pois parhaan mahdollisen kiinnityksen saavuttamiseksi. Dimensen putkivenymäanturin asennuksessa teräkseen käytetään anturin molempiin päihin kiinnitettyjä supermagneetteja (Kuva 10). Magneetin ja kiinnitysholkin välissä on teräslatat, jotka helpottavat anturin suuntausta torsion välttämiseksi. Jos putkeen tulee kiertoa, venymä ei välity anturiin halutulla tavalla.

Betonipintaan asennettaville OSMOS-valokuituantureille porataan kiinnitysreiät, joihin kiinnitetään ruuveilla messinkiset aluslevyt (Kuva 11). Anturi kiinnitetään ja esijännitetään aluslevyjen avulla. Monitorointimenetelmän muuttuessa jatkuvaksi monitoroinniksi anturit suojataan koteloinnilla. Dimensen putkivenymäanturille betoniin asennetaan kemiallisella ankkurilla kiinnitetty kierretanko (Kuva 12), johon anturi kiinnittyy jo edellä mainittujen teräslattojen avulla (Kuva 13).

Betoniraudoitteeseen pistevenymäanturi kiinnitetään liimaamalla. Liimausten kovettumisen aikana anturia pidetään paikallaan magneeteilla (Kuva 14)

DMM-taipuma-anturin teline kiinnitetään puristimilla teräspalkin alalaippaan. Itse anturi on kiinni metallisessa telineessä kahdella supermagneetilla (Kuva 15).

Siirtymäanturi kiinnitetään magneeteilla teräspalkin uumaan. Anturipäälle asennetaan vastinkappale betonikannen alapintaan betoniruuvilla (Kuva 16).



*Kuva 9. Teräspalkkiin liimattu pistevenymäanturi. Pyöreät magneetit pitävät anturia paikallaan liiman kovettumisen aikana (Dimense Oy).*



*Kuva 10. Teräspalkkiin magneettien avulla kiinnitetty putkivenymäanturi. (Dimense Oy)*



*Kuva 11. OSMOS-valokuituanturin kiinnitysmekanismi.*





*Kuva 12. Kierretanko kiinnitetty betoniin kemiallisella ankkurilla (Dimense Oy).*



*Kuva 13. Putkivenymäanturi kiinnitetty Kuva 12 kierretankoon (Dimense Oy).*



*Kuva 14. Raudoitteeseen kiinnitetty pistevenymäanturi.*



*Kuva 15. DMM-taipuma-anturin kiinnitys (Dimense Oy).*



*Kuva 16. Siirtymäanturin kiinnitys (Dimense Oy).*

## 11. Jatkuvan monitoroinnin enimmäiskatko aika

Kertamonitoroinnin aikana vikatilanteet korjataan kahden (2) arkivuorokauden sisällä vian havaitsemisesta. Ilkivaltatilanteissa katkoajoista sovitaan tilaajan kanssa erikseen. Monitoroinnin muuttuessa jatkuvaksi katkoajoista sovitaan uudelleen monitorointimenetelmän vaihtuessa.



## 12. Kaapeloinnin suunnittelu periaatteellisella tasolla

Kaapeloinnit kuljetetaan anturin kiinnityspintaa pitkin (esim. teräspalkkien ala- ja ylälaipat) tiedonkeruuyksikköön tuuliristikolta hyväksi käyttäen. Jos kaapelit tarvitsevat kiinnityksiä, käytetään kyseiseen materiaaliin sopivaa kiinnitysmekanismia. Osa valokuituantureista lähettävät mittaustiedot langattomasti, joten kyseiset anturit eivät tarvitse kaapelointia.

## 13. Mitatun datan tallennus, formaatti ja tiedonsiirto

Kaikkien antureiden mittaustietoja voi seurata selainpohjaisesta käyttöliittymästä lukuun ottamatta langattomia V2-valokuituantureita, jotka tarvitsevat erillisen ohjelmiston tietokoneelle.

Monitorointidata voidaan kerätä siltapaikalle asennettuun tiedonkeruuyksikköön, josta tiedot on purettavissa koekuormituksen ja kertamonitoroinnin jälkeen. Vaihtoehtoisesti mittaustieto voidaan lähettää reaaliaikaisesti palveluntarjoajan pilvipalveluun. Jatkuvan monitoroinnin osalta tilannetta tarkastellaan erikseen.

Siltapaikalla oleva tiedonkeruuyksikkö sijoitetaan lukittavaan metallikaappiin suojaan ilkvallalta sekä suoralta sateelta. Toimittaja toimittaa tarvittavan kaapin ja tilaaja järjestää kaapille tarpeellisen sähköntuoton.

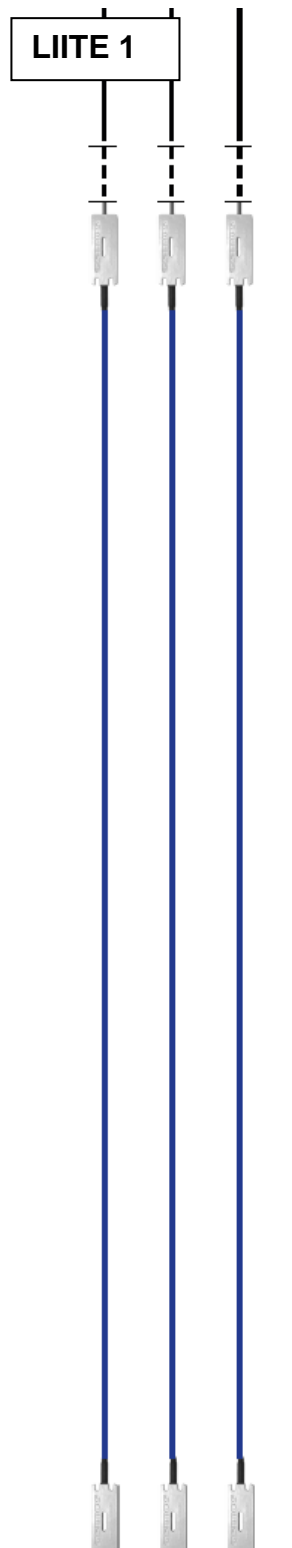
Mitattava tieto tallennetaan mittaavilta antureilta aikasarjana ASCII- muodossa. Tallennettu tieto on tallennettava siten, että datasta on selkeästi antureittain erotettavissa seuraavat asiat:

- mittausajankohta
- mittaustaajuus
- mittaava anturi
- mitattava suure
- mittauksen tekijä

## 14. Analysoinnin ja raportoinnin määrittäminen

Antureiden vertailuun liittyvät tulokset raportoidaan Arttu Ollikkalan diplomityössä.

Mittaustulosten analysointi ei sisälly mittausjärjestelmän toimittamiseen. Tulosten analysointi ja vertaaminen rakennelaskentamalliin tehdään erillisessä toimeksiannossa. Mittausjärjestelmän toimittajan on kuitenkin tarvittaessa toimitettava analysoinnin tekijälle käyttöoikeudet mittausdata palvelimelle sekä toimitettava tarvittaessa mittausaineistoa erillisen pyynnön mukaisesti.



## osmos TECHNOLOGY

### EAS

#### Expert Acquisition System (EAS) and Wired Optical Strand

##### EAS Optical Strand

The Optical Strand is an innovative device for measuring changes in geometric shape and position over long measurement paths.

The Optical Fiber length is between 1 and 10 meters. It is available in various configurations : metal-sheathed + PVC, the Optical Strand can be set in the structure itself to be monitored

- Multi-channel simultaneous detection
- Remote data consultation via ADSL, 3G or 4G
- Expert Acquisition Unit compatible with most analog sensors available on the market
- Incorporated alert system via SMS, Fax or email



##### Universal Expert Acquisition Unit

The Universal Expert Acquisition Unit developed by OSMOS integrates all the data from the structure behavior without any pause and allows a remoted real-time access to data via ADSL internet / 3G or 4G.

##### Additional analog sensors

The E.A.S acquisition system allows the incorporation of most analog sensors available on the market (optical fibers, extensometers, accelerometers, tilt meters, anemometers...) including an incorporated alert system via SMS, Fax or email to inform the end user of any unexpected behavior.



Accelerometers
Anemometers
Weather vanes
Hygrometers
Tiltmeters
Piezometers
Temperature probes
Rain gauges
Strain Gauges

**osmos**  
STRUCTURAL HEALTH MONITORING

[www.osmos-group.com](http://www.osmos-group.com)

## LIITE 1

### EAS OPTICAL STRAND

Length	1m/2 m
Measurement range	3 mm (1m) / 4 mm (2m)
Resolution	0,001 mm
Sampling frequency	up to 100 Hz
EMC, Strand part	Insensitive and neutral
Connexion Without intermediate amplification	optic cable up to 1 km long connected to the OSMOS monitoring station optic cable wrapped with pre-assembled connectors

### UNIVERSAL EXPERT ACQUISITION UNIT (EAS)

Ambient temperature	between -10° C and + 52° C without cooling
Emergency power	24 V, 2 A
Cabinet	insert 19", in height
Voltage	100 V à 260 V CA
Signal processing	dynamic medium, interval 10 ms 1s, configurable ring buffer 300 average dynamic, 3s to static me- dium 300s 100s 86 400s (1 day)
Alerts	dynamic, static with 4 thresholds configurable local information by external relays or by e-mail, SMS, fax, configurable
Recording	average point or dynamic thresholds are exceeded static medium as standard
Representation	dashboard, X-Y graph, polar, table, web interface
Communication	http, telnet, SMTP, FTP, TCP/IP, SMS
Memory capacity	64Go
Voltage	24 V DC, 2 A
Inputs	4 optical sensors, resolution 1 micrometer, 100 Hz acquisition frequency. 4 PT1000 temperature sensors, resolution 0.1 ° C, accuracy of 0.1 ° C, 0.5 ° C absolute, scanning frequency 10 Hz 4 inputs 0,10V or 4mA for additional sensors for voltage inputs 0 V to 10 V DC, 16 bit resolution, scanning frequency 100 Hz
Exits	RS422 interface, 2 relays Ethernet 10/100/1000 Base T interface



**osmos**  
STRUCTURAL HEALTH MONITORING

[www.osmos-group.com](http://www.osmos-group.com)

## LIITE 2



# osmos TECHNOLOGY

## LIRIS Optical Strand Autonomous and wireless sensor

The LIRIS measures deformations distributed over a representative length of 1 and 2 meters, with 50Hz detection. With its integrated mini-station, the LIRIS overcomes external power and any wired connection, while maintaining long battery life, up to 3 years.

- Quick installation
- Very simple handling and configuration
- Movable according to the site's needs
- Follows the structural geometries
- Adaptable to heterogeneous materials

### MAIN CHARACTERISTICS

Battery life	Up to 3 years
Sampling frequency	50 Hz
Automatic recordings	- 1 value per hour in static mode - 1 value every 20 msec in dynamic mode, with buffer memory for input of the whole event: Data recording before and after the event
Resolution	20µm without filtering (low power) 10µm max with filtering
Communication	USB Radio modem

### SMS/GPRS Module



Off-site alarm system by SMS, informing the recipient of a threshold crossing.



### Alerte Module



Visual and sound alert system, alarms in case of going over the threshold, set up by our engineers.



**osmos**  
STRUCTURAL HEALTH MONITORING

**LIITE 2****LIRIS OPTICAL STRAND**

Length	2 meters or 1 meter
Measurement range	4 mm (If length 2 m), 3 mm (If length 1 m)
Resolution	20µm without filtering (low power) 10µm max with filtering
Sampling frequency	50 Hz
Temperature range	-10°C to 40 °C
EMC, Strand part	Insensitive and neutral
Endbox:	Dimensions [L x W x H]: [100 x 40 x 15] mm Material: Aluminium

**MINI-STATION**

Mini-Station Box	Dimensions: [230 x 40 x 60] mm. Weight: 600 g
ECM	EC Qualification pending
Radio link	Use of ISM bands (*) : 867 MHz/868 MHz/902 MHz (*) Industrial, Scientific and Medical.
Transmission power	10 mW in antenna output
Reception sensitivity	-100 dBm
Power supply	By special battery, integrated to the mini-station box hood
Battery life	Up to 3 years
Dynamic storage capacity	18 minutes at 50 Hz or ~250 events of 5 seconds.
Static storage capacity	~6 mois, with an hourly recording
Trigger mode	Dynamic mode

**RADIO MODEM**

Power supply	Via USB
Communication port	USB 2.0
Antenna connection	Mini SMA type
Transmission power	10 mW
Reception sensitivity	-100 dBm

**osmos**  
STRUCTURAL HEALTH MONITORING

## LIITE 3

DIMENSE

## DMM – Tasomittausräite

DMM (Deflection Multi Meter) on uudentyyppinen tasomittausräite suurten kantavien rakenteiden, kuten siltojen, kunnonvalvontaan. Tasolaseristä ja DMM-yksiköistä koostuva mittaläite monitoroi mm. rakenteen taipumaa useista pisteistä reaaliajassa, mikä tekee siitä ainutlaatuisen verrattuna muihin mittausmenetelmiin, kuten takymetriin. DMM-tasomittausräite mittaa pystysuuntaista poikkeamaa suhteessa laserin muodostamaan referenssitasoon, joten se soveltuu myös automaattiseen painumamittaukseen, esimerkiksi rakennustyömailla. Myös horisontaalisen poikkeaman, kuten heilunnan, mittaus on DMM-tasomittausräiteellä mahdollista.

Kukin DMM-yksikkö sisältää optisen tasoanturin, kaksisuuntaisen kallistus- ja kiihtyvyyssanturin sekä tulokanavat kolmelle ulkopuoliselle jännite- tai virtälähtöiselle anturille, kuten venymäliuskalle, siirtymäanturille tai termoelementille. Toisiinsa ketjutetut DMM-yksiköt luetaan tietokoneella, joka tallentaa mittaustulokset tai lähettää ne esimerkiksi pilvipalvelimelle. Mittaustuloksia voidaan tarkastella järjestelmän mukana toimitettavalla DMM Commander -ohjelmalla, joka toimii Windows-, OS X- tai Linux-käyttöjärjestelmissä.

DMM-anturiyksiköstä on tarjolla myös WLAN-radiolinkkiin perustuva akkukäyttöinen versio, mikä yhdessä supermagneettiin perustuvan kiinnitysratkaisun kanssa tekee järjestelmästä erittäin joustavan ja nopean asentaa. Varustettuna aurinkopaneeleilla ja 3G-modeemilla DMM-tasomittausräite toimii itsenäisesti jopa vuosia ilman ulkopuolista kaapelointia.



DMM – Tasomittausräite

DIMENSE OY  
Paulaharjuntie 22  
90530 Oulu

email: info@dimense.fi  
p. 040-7671344  
www.dimense.fi

## LIITE 3

# DIMENSE

## Tekninen suorituskyky

### Resoluutio:

Pystypoikkeama	0.5 mm (kertamittaus, paranee keskiarvostuksella)
Kiihtyvyys	1 mg (x- ja y-tasot, $f_{-3dB} = 50$ Hz)
Kallistuma	0.01 ° (2-suuntainen, $f_{-3dB} = 1$ Hz)
Ulkoinen jännite- ja virtatulo	0 – 3.75 V / 24 bit (voidaan muuttaa virtatuloksi)

### Näytteenottotaajuus:

Pystypoikkeama	10 Hz (600 rpm, tasolaserin pyörintänopeus)
Kiihtyvyys	100 Hz (alipäästösuodatettu, max 4.8 kHz)
Kallistuma	10 Hz (alipäästösuodatettu, max 4.8 kHz)
Ulkoinen jännite- ja virtatulo	max 4.8 KHz

### Mittausalue:

Pystypoikkeama:	0 – 160 mm
Kiihtyvyys	± 1.7 g
Kallistuma	± 45 °
Ulkoinen jännite- ja virtatulo	(0 – 3.75 V ; 4 – 20 mA)

### Tekniset parametrit:

DMM-yksiköiden lukumäärä ketjussa	1 – 20
Käyttöjännite	6.5 – 36 V
Virrankulutus	170 mA / DMM
Tiedonsiirtoväylä	2 x RS-485 (tulo- ja lähtöliitäntä)
Ulkoiset anturiliitännät	3 x jännite- tai virtatulo (0 – 3.75 V ; 4 – 20 mA)
Tiedonsiirto-optiot	RS-485, WLAN (sis. akkupaketin)
Mitat ja paino ilman kiinnitysmekaniikkaa	71 x 64 x 215 mm (syvyys x leveys x korkeus), 1kg
Kotelon materiaali	Alumiini
Liittimien tyyppi	MIL-5015
Käyttölämpötila-alue	- 20 °C ... +45 °C

### Tasolaser:

Pyörintänopeus	600 rpm
Laserin tyyppi	Leica Rugby 830 (tai vastaava)

DMM - Tasomittauslaite



## LIITE 4

### Käyttökohteet

- Yleinen korkeuden ja syvyyden mittaus
- Pienten ja keskisuurten työmaiden korkeuksien tarkistaminen
- Valumuotien ja anturapulttien korkojen vaaittaminen
- Maapinnan leikkauksen ja täytön arviointi
- Kaivuussyvyyden mittaukset
- Kallistusmittaukset ojien, pihojen ja putkien asennustoissa



### Kallistettava lujarakenteinen tasolaser



Trimblen automaattisesti tasaava Spectra Precision® LL300S on maailman lujarakenteisin tasolaser. Tämä tasolaser täyttää varmasti kaikki työmaan tarkkuus- ja toimintavaatimukset. LL300S toimii ankarissakin työmaolosuhteissa tuottaen toistettavan tarkan lopputuloksen, jotta voit työskennellä entistä nopeammin ja tehokkaammin.

LL300S tasolaserin ainutlaatuinen rakenne kestää putoamisen betonille jopa yhden metrin korkeudelta ja kolmijalalla kaatumisen jopa 1,5 metrin korkeudelta. Erittäin kestävä rakenne yhdistettynä erinomaiseen sään- ja pölynkestävyyteen takaa laserin pitkäikäisyyden ja vähentää huomattavasti huoltokustannuksia.

LL300S on helppokäyttöinen, automaattisesti tasaava ja erittäin tarkka tasolaser. Valinnainen RC402N radiokaukosäädin mahdollistaa laserlähettimen etäkäytön ja lasertason kallistamisen. Kaukosäätimellä lasertaso on helppo kallistaa ilman apumiestä.



### Pääominaisuudet

- Automaattitasaus
- Tarkkuus 1,5mm 30 metrillä
- Työskentelyalueen halkaisija 800m
- Yksinkertaiset painikkeet kallistuksen asetukseen
- Tasausvahtitoiminto - säteen pyörintä pysähtyy laitteen liikahtaessa virheellisten mittausten välttämiseksi
- Pitkän matkan radiokaukosäädin (lisävaruste)
- Esteetön 360 asteen toiminta-alue (ei katvekulmia)
- Erittäin kestävä ja luotettava
- 5 vuoden takuu

### Käytännön edut

- Täydellinen mittauskalusto yhdessä laukussa – mukaan lukien jalat ja latta
- Helppo kuljettaa, kantaa ja säilyttää
- Pitkä käyttöaika ladattavalla akulla tai paristoilla
- Erittäin luja rakenne kestää jopa 1 metrin pudotuksen betonille
- Radiokaukosäädin mahdollistaa kaikkien laserlähettimen toimintojen etäkäytön





## Kallistettava lujarakenteinen tasolaser

### LIITE 4

#### LL300S tekniset tiedot

- Lasersäde: 650 nm, Luokka 2, <3,4 mW
- Tason tarkkuus:  $\pm 1,5$  mm 30 metrillä
- Toiminta-alueen halkaisija: 800 metriä
- Toiminta-alueen halkaisija (RC402N): 100 metriä
- Automaattitasausalue:  $\pm 5$  astetta
- Automaattitasausmenetelmä: Elektroninen automaattitasaus
- Pudotuksenkestävyys betonille: 1 metri
- X- ja Y akselisuunnan manuaalinen kallistus: Kyllä (automaattitasaus Y- akselilla)
- Tasausvahtitoiminto varoitus: säteen pyörintä pysähtyy, tasauksen merkkivalo vilkkuu ja laite antaa äänimerkin
- Virtalähde: 4 x D- kokoiset NiMH -akkennot tai alkaliparistot
- Pariston/akun kesto: Ladattava: 47 tuntia, Alkali: 60 tuntia
- Akun varaus LED-merkkivalo: Vilkkuu kun virta vähissä
- Pyörintänopeus: 600 kierrosta/ min
- Jalustakiinnitys (vaaka- ja pystysuorassa):  $5/8" \times 11$
- Käyttölämpötila:  $-20...+50$  °C
- Säilytyslämpötila:  $-20...+70$  °C
- Vesitiivis: Kyllä, IP66 tiiveysluokitus
- Koko: 27,2 (P)  $\times$  19,7 (L)  $\times$  20,1 (K) H cm
- Paino: 2,7 kg
- Takuu: 5 vuotta



Lujarakenteinen LL300S laserlähetin

#### HL450 tekniset tiedot

- Digitaalinenäytön yksiköt: mm, jalka, tuuma...
- Vastaanottokennon korkeus: 102 mm
- Kolme mittaustarkkuutta:
  - Tarkka tarkkuus 1 mm
  - Vakiotarkkuus 5 mm
  - Kalibrointitila 0,1 mm
- Akun/pariston kesto (2 x AA): Yli 70 tuntia
- Automaattinen sammutus: 30 minuuttia
- Käyttölämpötila:  $-20...+50$  °C
- Pölyn- ja vedenkestävä: Kyllä, IP67 tiiveysluokitus
- Paino ilman puristinkiinnikettä: 371 g
- Takuu: 3 vuotta, joista 2 ensimmäistä vuotta "No Excuses"



RC402N kaukosäädin  
lasertason kallistukseen  
(lisävaruste)



HL450 numeronäyttövastaanotin ja  
C45 puristinkiinnike (vakiovaruste)



Koko laserkaluston kattava  
kuljetuslaukku sisältää jalan  
ja mittalatan

Perinteinen kuljetussalkku  
sisältää vain laserin ja  
vastaanottimen

Molemmat varusteluvaihtoehdot  
ovat saatavilla akku- tai  
paristokäyttöisinä.



#### Yhteystiedot:

##### POHJOIS-AMERIKA

Trimble - Spectra Precision Division  
5475 Kellenburger Road • Dayton, Ohio 45424 • USA  
+1-888-272-2433 (maksuton) • Fax +1-937-245-5489  
[www.spectralasers.com](http://www.spectralasers.com)

##### EUROOPPA

Trimble Kaiserslautern GmbH  
Am Sportplatz 5 • 67661 Kaiserslautern • SAKSA -  
DEUTSCHLAND  
Puhelin +49-6301-711414 • Fax +49-6301-32213



Spectra Precisionin jälleenmyyjät: [www.spectralasers.com](http://www.spectralasers.com) tai [www.trimble.com](http://www.trimble.com)

Määritykset ja kuvaukset voivat muuttua ilman eni ilmoitusta. Ajantasaiset tuotetiedot löytyvät osoitteista [www.spectralasers.com](http://www.spectralasers.com) tai [www.trimble.com](http://www.trimble.com).

© 2014, Trimble Navigation Limited. Kaikki oikeudet pidätetään. Trimble, Globe & Triangle -logot ja Spectra Precision ovat Trimble Navigation Limitedin tavaramerkkejä, rekisteröityjä Yhdysvaltojen patentti- ja tavaramerkkivirastossa sekä muissa maissa. Kaikki muut tavaramerkit ovat niiden haltijoiden omaisuutta.

PN 022507-392-F1 (11/14)

## LIITE 5



## Optical Sensing Interrogator | sm125

## Applications

- Full Spectrum Measurements of fiber Bragg grating (FBG), extrinsic Fabry-Perot, long period grating (LPG), and other optical sensor components.
- Continuous lifetime health monitoring of bridges, dams, buildings, tunnels, ships, aircraft, trains, and other complex structures.
- Development of fiber optic sensors and transducers.

## Features

- High accuracy absolute measurements of strain, temperature, pressure and other static sensors.
- On-board NIST traceable wavelength reference.
- Wide wavelength swept laser supporting more sensors per channel.

## Deployments

- Civil structures (bridges, dams, tunnels, mines, buildings).
- Energy (wind turbines, pipelines, nuclear reactors, solar panel farms).
- Oil & gas (well reservoir management, platform structural health, pipeline condition).
- Aerospace vehicles (airframes, composite structures, wind tunnels, dynamic tests).
- Marine vessels (hull, mast, rudder, deck, cargo containers).
- Transportation (railways, trains, roadways, specialty vehicles, cranes).
- Homeland security (perimeter intrusion, heat detection, security gate monitoring).
- Medical devices (probes, catheters).

## Description

The sm125 Optical Sensing Interrogator is a compact, field proven, industrial grade static sensor interrogation module designed for robust, reliable, long term field operation.

The sm125 Optical Sensing Interrogator is built upon the Micron Optics x25 optical interrogator core, featuring a high power, low noise swept wavelength laser, realized with Micron Optics patented Fiber Fabry-Perot Tunable Filter technology. The x25 interrogator core employs full spectral scanning and data acquisition, providing measurements with high absolute accuracy, flexible software post-processing, and high dynamic range performance. x25 based interrogators support continuous on-board NIST traceable wavelength reference components and are ideally suited to measure many different optical sensor types, including FBGs, long period gratings, extrinsic Fabry-Perot sensors, and many others. Well over half of the fiber optic sensors deployed today are measured with instrumentation that uses Micron Optics technology.

The Micron Optics "sm - Sensing Module" platform responds directly to the user commands of the optical interrogator core and outputs sensor wavelength data via Ethernet port and custom protocol. All module settings, sensor calculations, data visualization, storage, and alarming tasks are run on external pc or sensor processor module. The Sensing Module platform is ideal for custom, client developed system management tools, but is equally compatible with local or remote installations of Micron Optics ENLIGHT.



sm125 Field Module

Micron Optics ENLIGHT Sensing Analysis Software is included with Micron Optics sensing interrogator systems and provides a single suite of tools for data acquisition, computation, and analysis of optical sensor networks. ENLIGHT combines the useful features of traditional sensor software with the specific tools needed to optimize optical properties during the design, implementation, and operations phases of an optical sensor system. Tables, graphs, and additional data visualization features make ENLIGHT easy to use. Learn more about ENLIGHT at [http://www.micronoptics.com/sensing\\_software.php](http://www.micronoptics.com/sensing_software.php).



Products displaying the "Micron Optics Tuned" logo include Micron Optics tunable technologies insuring high quality and performance.

**LIITE 5**
**Optical Sensing Interrogator | sm125**
**Specifications**

	sm125-200	sm125-500	sm125-700
<b>Optical Properties</b>			
Number of Optical Channels <sup>1</sup>	1 (up to 16)	4 (up to 16)	4 (up to 16)
Scan Frequency	1 Hz	2 Hz	5 Hz
Wavelength Range	1520-1570 nm	1510-1590 nm	1510-1590 nm
Wavelength Accuracy <sup>2</sup>	10 pm	1 pm	2.5 pm
Wavelength Stability <sup>3</sup>	5pm	1 pm	2.5 pm
Wavelength Repeatability <sup>4</sup>	1 pm at 1 Hz	0.5 pm at 1 Hz, 0.2 pm at 0.1 Hz	
Dynamic Range <sup>5</sup>	40 dB	50 dB	30 dB
Full Spectrum Measurement	Included		
Internal Peak Detection Mode	Included		
Optical Connectors	FC/APC		

**Data Processing Capabilities**

Interfaces	Ethernet - other interfaces available via an sp125 Sensing Processor Module
Protocols	Custom Micron Optics protocol via Ethernet (others available)
Remote Software	Spectral analysis, peak detection, data logger, peak tracking, and instrument control
LabVIEW™ Source Code	Allows for customization of remote software
Enhanced Data Management	ENLIGHT Sensing Analysis Software

**Mechanical, Environmental, Electrical Properties**

Dimensions; Weight	117 mm x 234 mm x 135 mm; 2 kg (4.5 lbs)
Operating Temperature; Humidity	0° to 50° C; 0 to 80%, non-condensing
Storage Temperature; Humidity	-20° to 70° C; 0 to 95%, non-condensing
Input Voltage	7-36 VDC (100~240 VAC, 47~63 Hz), AC/DC converter included
Power Consumption at 12V	20 W typ, 30 Max

**Options**

8 or 16 Channel Expansion	Please see our 8 or 16 channel sm041 multiplexers
Increased Scan Frequency <sup>6</sup>	2, 5, or 10 Hz

**Notes:**

1. sm125 accommodates up to 4 Integrated optical channels. Max of 16 ch possible when combined with sm041 multiplexer.
2. Per NIST Technical Note 1297, 1994 Edition, Section D.1.1.1, definition of "accuracy of measurement"
3. Captures effects of long term use over full operating temperature range of the instrument.
4. Per NIST Technical Note 1297, 1994 Edition, Section D.1.1.2, definition of "repeatability [of results of measurements]"
5. Defined as laser launch power minus detection noise floor.
6. 10 Hz scan rate available with 40 nm (1525-1565nm) wavelength range.



Micron Optics, Inc.  
1852 Century Place NE  
Atlanta, GA 30345 USA

phone 404 325 0005  
fax 404 325 4082  
www.micronoptics.com

Copyright ©2009, Micron Optics, Inc, sm125\_0904\_d\_0904.3

## LIITE 6



## Surface Mount Strain Sensor | os3610

## Applications

- Continuous long-term health monitoring of bridges, dams, buildings, tunnels, ships, trains, and other complex structures.
- Measurement of strain on the surface of concrete, rock, steel, composite, and other structures.

## Features

- Qualified to same rigorous standards used for comparable electronic gages.
- Temperature compensation sensor integrated inside. Measurement of relative temperature for compensation of strain measurements.
- Cable integrated with sensor package for fiber protection and strain relief.
- Fast, simple, repeatable installation.
- Connector protection fittings available for harsh environment.
- Armored fiber cable and rugged sensor package.
- Double ended design supports multiplexing of many sensors on one fiber.
- Two standard gage lengths.
- Micron Optics' patented micro opto-mechanical technology.
- Included in ENLIGHT's sensor templates- allows for quick and easy optical mechanical conversions.
- IP67 rated for protection from dust and water ingress.
- User adjustable zero point optimizes full use of strain range.

## Description

The os3610 Surface Mount Strain Sensor measures average strain over the length of the gage while providing integrated temperature compensation. It is based on fiber Bragg grating (FBG) technology. The os3610 is intended exclusively for surface mounting. Each end of the os3610 is attached to the structure via rigid brackets that are either welded, bolted, epoxied, or grouted to the surface of a concrete, rock, steel, composite, or other structure.



os3610 surface mount strain sensor



Bolt-on



Grout-in



Weldable

Armored cables, a rugged sealed steel body, and optional connector protection fittings make the os3610 suitable for harsh environments. Two FBGs are well protected inside the os3610 body. One FBG measures strain, and the other provides for integrated temperature compensation. Since there are no epoxies holding the fiber to the carrier, long-term stability is ensured by design.



Connector Protection Fitting

In side-by-side comparisons with vibrating wire and foil strain gages, the os3610 is equally sensitive and accurate, while providing corrosion insensitivity and 100 times more fatigue life. The os3610 strain gage is qualified for use in harsh environments and delivers the many advantages inherent to all FBG based sensors.

This sensor can be used alone or in series as a part of an FBG sensor array. Installation and cabling for such arrays is much less expensive and less cumbersome than comparable electronic gage networks.



Products displaying the "Micron Optics Tuned" logo include Micron Optics tunable technologies ensuring high quality and performance.

LIITE 6

Surface Mount Strain Sensor | os3610

Specifications <sup>B</sup> 1

os3610

Performance Properties

Strain; Temperature Sensitivity <sup>2</sup>	~ 1.2 pm/με; 22 pm/°C
Temperature Compensation	Integrated into each gage
Gage Length	25 or 100 cm
Operating Temperature Range	-40 to 80°C
Strain Limits	5,000 με (Zero point set by user)
Water Resistant	Suitable for wet, high humidity environments (IP67)
Fatigue Life	> 1x10 <sup>6</sup> cycles @ ± 2,000 με

Physical Properties

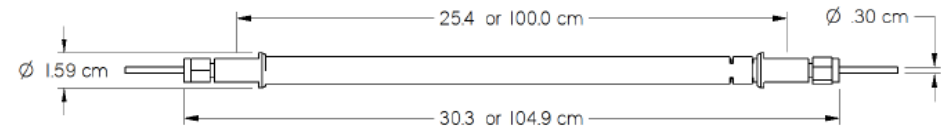
Dimensions	See diagram below
Weight	190 g (25 cm); 384 g (100 cm)
Material	Stainless steel construction
Cable Length	1 m (± 10 cm), each end
Cable Type	3 mm armored cable
Cable Bend Radius	≥ 17 mm
Anchoring Methods <sup>3</sup>	Surface mount only: bolt-on, grout-in, weldable brackets available

Optical Properties

Peak Reflectivity (R <sub>max</sub> )	> 70%
FWHM (-3 dB point)	0.25 nm (± .05 nm)
Isolation	> 15 dB (@ ± 0.4 nm around center wavelength)

Notes:

1. Denotes Beta product. For more details see [www.micronoptics.com/product\\_designation.php](http://www.micronoptics.com/product_designation.php).
2. Actual gage factor provided with gage.
3. See [http://www.micronoptics.com/support\\_downloads/Sensors/](http://www.micronoptics.com/support_downloads/Sensors/) for installation details.



Ordering Information

os3610-ggg-tttt/ssss-1xx-1yy-a (Example: os3610-025-1512/1516-1FC-1FC-U)

<b>ggg:</b> Gage Length 025 (cm) 100 (cm)	<b>tttt/ssss:</b> Temperature/Strain Wavelength (±1nm) Standard: 1512/1516, 1522/1526, 1532/1536, 1542/1546, 1552/1556, 1562/1566, 1572/1576, 1582/1586 Extended: 1460 to 1620 nm	<b>1 xx:</b> Cable 1, length & connector 1 1m standard, cable length UT Unterminated FC FC/APC connector  <b>1 yy:</b> Cable 2, length & connector 1 1m standard, cable length UT Unterminated FC FC/APC connector	<b>a:</b> Anchoring Method U Universal
---	---	--	---



Micron Optics, Inc. phone 404 325 0005  
1852 Century Place NE fax 404 325 4082  
Atlanta, GA 30345 USA [www.micronoptics.com](http://www.micronoptics.com)

Copyright ©2012, Micron Optics, Inc, os3610\_1207a\_12071



## LIITE 7



## Optical Strain Gage | os3100

## Applications

- Continuous lifetime health monitoring of bridges, dams, buildings, tunnels, ships, aircraft, trains, and other complex structures.
- Core building block for fiber optic transducers for strain, temperature, displacement, pressure, and acceleration.
- Measurement of strain on a structure's surface.
- Experimental mechanics evaluations requiring many sensors.

## Features

- Rugged, permanent weldable package (os3110).
- Rugged package fastens with same epoxy as conventional foil strain gage (os3120).
- Qualified to same rigorous standards used for comparable electronic gages.
- Cable integrated with sensor package for fiber protection and strain relief.
- Fast, simple, repeatable installation.
- Double ended design supports multiplexing of many sensors on one fiber.
- Gage installation and protection achieved with same methods as conventional electronic gages.
- Micron Optics' patented micro opto-mechanical technology.

## Description

The os3100 Optical Strain Gage is designed to make fiber handling easy and sensor installation fast and repeatable. It is based on fiber Bragg grating (FBG) technology. The os3100's stainless steel carrier holds the FBG in tension and protects the fiber during installation. Since there are no epoxies holding the fiber to the carrier, long term stability is ensured by design.

Two packaging options provide for either weld or epoxy attachment to a structure's surface. Installation time is just a few minutes. Welded gages can be used immediately after attachment. Epoxy gages typically cure in less than 24 hours at room temperature, similar to electronic foil strain gages.

In side by side comparisons with foil strain gages, the os3100 is equally sensitive and accurate, while providing for greater strain range and 100 times more fatigue life. The os3100 strain gage is qualified for use in harsh environments and delivers the many advantages inherent to all FBG based sensors.

This sensor can be used alone or in series as a part of an FBG sensor array. Installation and cabling for such arrays is much less expensive and cumbersome than comparable electronic gage networks. Multiple optical strain gages can be arranged in close proximity at 0, 45 and 90 degrees for strain rosette measurements.



With each sensor, Micron Optics provides a Sensor Information Sheet listing the gage factor and calibration coefficients needed to convert wavelength information into engineering units. Micron Optics' ENLIGHT Sensing Software provides a utility to calculate and then record, display, and transmit data for large networks of sensors. Installation, qualification and other sensor information is available at: [http://www.micronoptics.com/support\\_downloads/Sensors/](http://www.micronoptics.com/support_downloads/Sensors/).



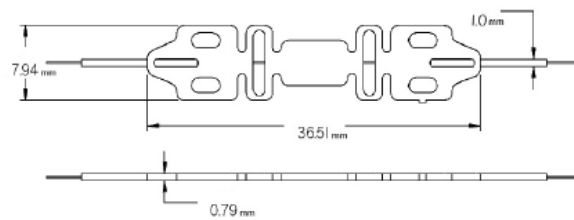
Products displaying the "Micron Optics Tuned" logo include Micron Optics tunable technologies ensuring high quality and performance.

## LIITE 7

## Optical Strain Gage | os3100

Specifications <sup>1</sup>

Specifications	os3110 Spot Weld	os3120 Epoxy Mount
Performance Properties		
Strain Sensitivity <sup>2</sup>	~ 1.4 pm/μE	
Gage Length	22 mm	
Operating Temperature Range	-40 to 120° C (150° C short-term)	
Strain Limits	± 2,500 μE	
Fatigue Life	100 x 10 <sup>6</sup> cycles, ± 2,000 μE	
Physical Properties		
Dimensions	See Diagram Below	
Weight	2.6 g	
Carrier Material	302 Stainless Steel	
Cable Length	1 m (± 10 cm), each end	
Fiber Type	SMF28-Compatible	
Cable Type	1 mm Fiberglass Braid	
Connectors	FC/APC optional	
Cable Bend Radius	≥ 17 mm	
Fastening Methods <sup>3</sup>	Spot Weld	Epoxy Mount
Optical Properties		
Peak Reflectivity (R <sub>max</sub> )	> 70%	
FWHM (-3 dB point)	0.25 nm (± .05 nm; apodized grating)	
Isolation	> 15 dB (@ ± 0.4 nm around center wavelength)	
Notes:		
1. Denotes Beta product. For more details see <a href="http://www.micronoptics.com/product_designation.php">www.micronoptics.com/product_designation.php</a> .		
2. Actual gage factor provided with gage. Note: F <sub>G</sub> is different for os3110 and os3120.		
3. See <a href="http://www.micronoptics.com/support_downloads/Sensors/">http://www.micronoptics.com/support_downloads/Sensors/</a> for installation details.		



## Ordering Information

Ordering Information		os31aa- <b>www</b> -1xx-1yy		(Example: os3110-1564-1FC-1FC)	
<b>aa:</b> Model		<b>www:</b> Wavelength (±1nm)		<b>1xx:</b> Cable 1, Length & Connector	
10 Spot Weldable		Standard: 1516 to 1588nm in 4nm intervals.		1 1 m Standard, Cable Length	
20 Epoxy Mount		Extended: 1460 to 1620nm		1 1 m Standard, Cable Length	
		UT Unterminated		UT Unterminated	
		FC FC/APC Connector		FC FC/APC Connector	



Micron Optics, Inc.  
1852 Century Place NE  
Atlanta, GA 30345 USA

phone 404 325 0005  
fax 404 325 4082  
[www.micronoptics.com](http://www.micronoptics.com)

Copyright ©2010, Micron Optics, Inc., os3100\_0905.b\_0905.1

2

## LIITE 8



## Non-metallic Temperature Sensor | os4300

## Applications

- Continuous lifetime health monitoring of bridges, dams, buildings, tunnels, ships, aircraft, trains, and other complex structures.
- Core building block for fiber optic transducers for strain, temperature, displacement, pressure, and acceleration.
- Measurement of absolute temperature on a structure's surface.
- Measurement of relative temperature for compensation of strain measurements.

## Features

- Fast response time.
- Qualified to same rigorous standards used for comparable electronic gages.
- Cable integrated with sensor package for fiber protection and strain relief.
- Non metallic construction.
- Fast, simple, repeatable installation.
- Connector protection fittings available for harsh environments.
- Armored fiber cable and rugged sensor package.
- Several package options for field and laboratory applications.
- Calibrated for high absolute accuracy.
- Double ended design supports multiplexing of many sensors on one fiber.
- Micron Optics' patented micro opto-mechanical technology.

## Description

The os4300 Non-metallic Temperature Sensor is a family of gages designed to make fiber handling easy and sensor installation fast and repeatable. It is based on fiber Bragg grating (FBG) technology. The os4300's body is a sealed, alumina ceramic tube that protects the FBG. Since there are no epoxies holding the fiber to the tube, long term stability is ensured by design.

Three packaging options provide for installation that mimics that of conventional thermocouples with armored cables and protected connectors, and small sensors that provide the user with both installation flexibility and sub second response.

In side by side comparisons with conventional thermocouples, the os4300 is equally accurate, while providing for much faster response, wider operating range, no calibration, and less noise. The os4300 temperature sensor is qualified for use in harsh environments and delivers the many advantages inherent to all FBG based sensors.

This sensor can be used alone or in series as part of an FBG sensor array. Installation and cabling for such arrays is much less expensive and cumbersome than comparable electronic gage networks.



With each sensor, Micron Optics provides a Sensor Information Sheet listing the gage factor and calibration coefficients needed to convert wavelength information into engineering units. Micron Optics' ENLIGHT Sensing Software provides a utility to calculate and then record, display, and transmit data for large networks of sensors. Installation, qualification and other sensor information is available at: [http://www.micronoptics.com/support\\_downloads/Sensors/](http://www.micronoptics.com/support_downloads/Sensors/).



Products displaying the "Micron Optics Tuned" logo include Micron Optics tunable technologies ensuring high quality and performance.



## LIITE 8

## Non-metallic Temperature Sensor | os4300

Specifications <sup>1</sup>

Specifications 	os4310 Non-metallic	os4330 Non-metallic Epoxy Mount	os4350 Armored Cable, Flange Mount
Thermal Properties			
Operating Temperature Range	-40 to 120°C (-40 to 250°C for Single Ended version)		
Temperature Sensitivity	~10pm/°C (±1.7 pm/ °C)		
Cable Temperature Range	-40 to 250° C (FC/APC Connectors: -40 to 80°C)		
Response Time <sup>2</sup>	0.7 seconds	4.6 seconds	4.2 seconds
Standard Calibration <sup>3</sup> (Included)	1.0°C Long Term Accuracy <sup>4</sup> 0.6°C Short-Term Accuracy, Typical <sup>5</sup>		
Premium Calibration <sup>3</sup> (Optional)	0.5°C Long Term Accuracy <sup>4</sup> 0.2°C Short Term Accuracy, Typical <sup>5</sup>		
Physical Properties			
Dimensions (L x W x H) <sup>6</sup>	18.8 x 3.2 x 3.2 mm	31.8 x 7.6 x 7.6 mm	31.5 x 15.0 x 7.6 mm
Weight (including cable)	2.6 g	4.3 g	38 g
Housing Material	Alumina	Alumina	Anodized Aluminum
Cable Length	1 m (± 10 cm)		
Fiber Type	SMF28-Compatible		
Cable Bend Radius	≥ 17 mm		
Cable Type	1 mm Fiberglass Braid	1 mm Fiberglass Braid	3mm Armored Cable
FC/APC Connectors	Optional	Optional	Both connector and protection fittings optional
Fastening Methods <sup>6</sup>	Bond Strain Reliefs only	Epoxy type	#6 Self Drilling Screws or Epoxy
Optical Properties			
Peak Reflectivity (Rmax)	> 70%		
FWHM (-3 dB point)	0.25 nm (± .05 nm)		
Isolation	> 15 dB (@ ± 0.4 nm around center wavelength)		

## Notes:

1. Denotes Beta product. For more details see [www.micronoptics.com/product\\_designation.php](http://www.micronoptics.com/product_designation.php).
2. Time to reach 63% of total temperature drop in water (100°C).
3. Absolute accuracy of sensor is dependent on capability of interrogation instrument.
4. Based on 120°C soak for 1,000 hours.
5. Four (4) thermal cycles from min to max temperature. Max. accuracy error ±0.4°C without data averaging.
6. See [http://www.micronoptics.com/support\\_downloads/Sensors/](http://www.micronoptics.com/support_downloads/Sensors/) for sensor drawings and installation details.

## Ordering Information

os43aa- <b>www</b> -1xx-1yy-z (Example: os4330-1560-1FC-1FC-P)				
<b>aa:</b> Model	<b>www:</b> Wavelength (±1nm)	<b>1xx:</b> Cable 1, Length & Connector	<b>1yy:</b> Cable 2, Length & Connector	<b>z:</b> Calibration Method
10 Non-metallic	Standard: 1512 to 1588nm in 4nm intervals	1 1 m Standard, Cable Length	1 1 m Standard, Cable Length	S Standard
30 Non-metallic, Epoxy Mount		UT Unterminated	00 Single Ended Sensor (available only for os4310)	P Premium
50 Armored Cable, Flange Mount (available only with FC option)	Extended: 1460 to 1620nm	FC FC/APC Connector	UT Unterminated	
		PF FC/APC Connector with Protection Fitting	FC FC/APC Connector	
			PF FC/APC Connector with Protection Fitting	



Micron Optics, Inc.  
1852 Century Place NE  
Atlanta, GA 30345 USA

phone 404 325 0005  
fax 404 325 4082  
[www.micronoptics.com](http://www.micronoptics.com)

Copyright ©2009, Micron Optics, Inc. os4300\_0905\_a\_0905.1

2

## LIITE 9



## LIPS® P103 SHORT STROKE LINEAR POSITION SENSOR

Position feedback for industrial and scientific applications

- Non-contacting inductive technology to eliminate wear
- Travel set to customer's requirement
- Short body length
- High durability and reliability
- High accuracy and stability
- Sealing to IP65/IP67 as required



As a leading designer and manufacturer of linear, rotary, tilt and intrinsically safe position sensors, Positek® has the expertise to supply a sensor to suit a wide variety of applications.

Our P103 LIPS® (Linear Inductive Position Sensor) is an affordable, durable, accurate position sensor designed for a wide range of industrial applications. It is particularly suitable for OEMs seeking good sensor performance in situations where a short-bodied sensor is needed and cost is important. The unit is compact and space-efficient, being responsive along almost its entire length, and like all Positek® sensors provides a linear output proportional to displacement. Each unit is supplied with the output calibrated to the travel required by the customer, from 2 to 50mm and with full EMC protection built in.

Overall performance, repeatability and stability are outstanding over a wide temperature range.

The sensor has a rugged stainless steel body and plunger. It is easy to install and set up, mounting options include flange and body clamps. The plunger can be supplied free or captive, with female M4 thread, or spring-loaded with a ball end. The P103 also offers a wide range of mechanical and electrical options, environmental sealing is to IP65 or IP67 depending on selected cable or connector options.

## SPECIFICATION

## DIMENSIONS

For full mechanical details see drawing P103-11

**Independent linearity** <  $\pm 0.25\%$  @ 20°C

**Temperature coefficients** <  $\pm 0.01\%/^{\circ}\text{C}$  Gain &

<  $\pm 0.01\%\text{FS}/^{\circ}\text{C}$  Offset

**Frequency response** > 10 kHz (-3dB)

> 300 Hz (-3dB) 2 wire 4 to 20 mA

**Resolution** Infinite

**Noise** < 0.02% FSO

## Environmental Temperature Limits

**Operating** -40 to +125°C standard

-20 to +85°C buffered

-40 to +125°C

**Storage** IP65/IP67 depending on connector / cable option

**Sealing** EN 61000-6-2, EN 61000-6-3

**EMC Performance** IEC 68-2-6: 10g

**Vibration** IEC 68-2-29: 40 g

**Shock** 350,000 hrs 40°C Gf

**MTBF**

**Drawing List** P103-11 Sensor Outline

Drawings, in AutoCAD® dwg or dxf format, available on request.

**Do you need a position sensor made to order to suit a particular installation requirement or specification? We'll be happy to modify any of our designs to suit your needs - please contact us with your requirements.**



For further information please contact:

[www.positek.com](http://www.positek.com) [sales@positek.com](mailto:sales@positek.com)

Tel: +44(0)1242 820027 fax: +44(0)1242 820615

Positek Ltd, Andoversford Industrial Estate, Cheltenham GL54 4LB U.K.

P103-170

# LIITE 9



## LIPS® P103 SHORT STROKE LINEAR POSITION SENSOR

Position feedback for industrial and scientific applications

### How Positek's PIPS® technology eliminates wear for longer life

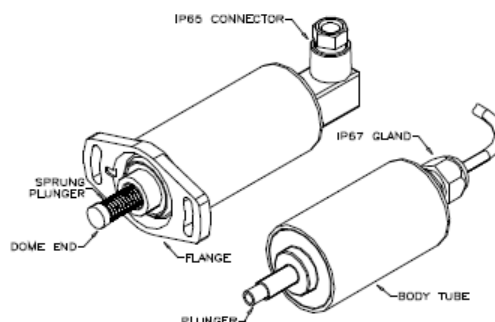
Positek's PIPS® technology (Positek Inductive Position Sensor) is a major advance in displacement sensor design. PIPS®-based displacement transducers have the simplicity of a potentiometer with the life of an LVDT/RVDT.

PIPS® technology combines the best in fundamental inductive principles with advanced micro-electronic integrated circuit technology. A PIPS® sensor, based on simple inductive coils using Positek's ASIC control technology, directly measures absolute position giving a DC analogue output signal. Because there is no contact between moving electrical components, reliability is high and wear is eliminated for an exceptionally long life.

PIPS® overcomes the drawbacks of LVDT technology – bulky coils, poor length-to-stroke ratio and the need for special magnetic materials. It requires no separate signal conditioning.

Our LIPS® range are linear sensors, while RIPS® are rotary units and TIPS® are for detecting tilt position. Ask us for a full technical explanation of PIPS® technology.

We also offer a range of ATEX-qualified intrinsically-safe sensors.



### TABLE OF OPTIONS

**MEASUREMENT RANGE:** Factory-set to any length from 2 to 50 mm in increments of 1mm.

#### ELECTRICAL INTERFACE OPTIONS

OUTPUT SIGNAL	SUPPLY INPUT	OUTPUT LOAD
Standard: 0.5-4.5V dc ratiometric	+5V dc nom. $\pm$ 0.5V.	5k $\Omega$ min.
Buffered: 0.5-4.5V dc	+24V dc nom. + 9-28V.	5k $\Omega$ min.
$\pm$ 5V dc	$\pm$ 15V dc nom. $\pm$ 9-28V.	5k $\Omega$ min.
0.5-9.5V dc	+24V dc nom. + 13-28V.	5k $\Omega$ min.
$\pm$ 10V dc	$\pm$ 15 V dc nom. $\pm$ 13.5-28V.	5k $\Omega$ min.
Supply Current	10mA typical, 20mA maximum.	
4-20mA (2 wire)	+24 V dc nom. + 18-28V.	300 $\Omega$ @ 24V.
(3 wire sink)	+24 V dc nom. + 13-28V.	950 $\Omega$ @ 24V.
(3 wire source)	+24 V dc nom. + 13-28V.	300 $\Omega$ max.

Option for output 'zero' and 'span' adjustment available.

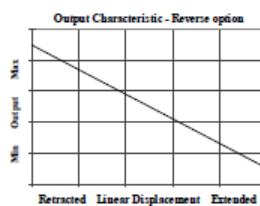
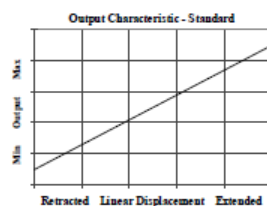
#### CONNECTOR/CABLE OPTIONS

Connector - Hirschmann GD series IP65  
Cable with M12 gland or short gland IP67  
Cable length >50cm – please specify length in cm

#### MOUNTING OPTIONS

Flange, Body Tube Clamp.

**PUSH ROD OPTIONS** – standard retained with M4x0.7 female thread  
Sprung loaded (spring supplied loose), Dome end (sprung loaded) or Free.



For further information please contact:

[www.positek.com](http://www.positek.com) [sales@positek.com](mailto:sales@positek.com)

Tel: +44(0)1242 820027 fax: +44(0)1242 820615

Positek Ltd, Andoversford Industrial Estate, Cheltenham GL54 4LB U.K.

P103-170